







UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

# TECNIACUSTICA 2015

## 46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
## 46º CONGRESSO ESPANHOL DE ACÚSTICA
## 46st SPANISH CONGRESS ON ACOUSTICS




## ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
## ENCONTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
## IBERIAN ENCOUNTER ON ACOUSTICS



AJUNTAMENT DE VALENCIA

## SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS
## SIMPÓSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL E AMBISONICS
## EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS







**Valencia, 21 - 23, Octubre / Outubro / October, 2015**

## PUBLICACIÓN OFICIAL DEL CONGRESO




# TECNIACÚSTICA 2015

## 46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
### 46º CONGRESSO ESPANHOL DE ACÚSTICA
### 46th SPANISH CONGRESS ON ACOUSTICS

## ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
### ENCONTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
### IBERIAN ENCOUNTER ON ACOUSTICS

## SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS
### SIMPÓSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL E AMBISONICS
### EUROPEAN SYMPOSION ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

## CONGRESO: 21 - 23, octubre / Outubro / October, 2015
## SIMPOSIO: 22, octubre / Outubro / October, 2015

Sede del Congreso / Sede do Congresso / Congress Venue:
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia

ISBN: 978-84-87985-26-3
ISSN: 2340-7441 (Versión Digital)

Editores / Editors
Antonio Calvo-Manzano (SEA)
Antonio Pérez-López (SEA)

© Copyright: Sociedad Española de Acústica -SEA-
El texto completo de las Conferencias y Comunicaciones se encuentra en la Publicación Oficial del Congreso en la WEB de la SEA: www.sea-acustica.es.
O texto completo da Conferência e Comunicações está na Publicação Oficial do Congresso em la WEB do SEA: www.sea-acustica.es.
The full text of the plenary lectures and papers can be found at the Congress Official Publication in the SEA's WEB: www.sea-acustica.es.

**COMITÉS / COMITÉS / COMMITTEES**

**COMITÉ DE HONOR / COMITÉ DE HONOR / HONOUR COMMITTEE**
**Molt. Hble. Sr. President de la Generalitat Valenciana**
Don Ximo Puig Ferrer
**Sr. Rector Magnífico de la Universitat Politècnica de València**
Don Francisco José Mora Mas
**Sr. Rector Magnífico de la Universitat de València**
Don Esteban Morcillo Sánchez
**Excmo. Sr. Alcalde del Ayuntamiento de València**
Don Joan Ribó Canut
**Hble. Sr. Conseller de Educación, Investigación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana**
Don Vicent Marzà Ibàñez
**Hble. Sra. Consellera de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural de la Generalitat Valenciana**
Doña Elena Cebrián Calvo
**Ilma. Sra. Concejala y Coordinadora General del Área de Medio Ambiente y Cambio Climático del Ayuntamiento de València**
Doña Pilar Soriano Rodríguez
**Ilma. Sra. Concejala y Coordinadora General del Área de Cultura del Ayuntamiento de València**
Doña Glòria Tello Company
**Sr. Vicerrector de Investigación, Innovación y Transferencia de la Universitat Politècnica de València**
Don José E. Capilla Romá
**Sr. Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universitat Politècnica de València**
Don Jorge García-Serra García
**Sr. Director del Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València**
Don Jorge Curiel Esparza

**COMITÉ DEL CONGRESO / COMITÉ DO CONGRESSO / CONGRESS COMMITTEE**
Antonio Calvo-Manzano Ruiz (SEA)
Rosa María Cibrián (UV)
Alicia Giménez (UPV)
Jorge Patricio (SPA)
Antonio Pérez-López (SEA)
Michael Taroudakis (EAA)
Michael Vorländer (ICA)

**COMITÉ ORGANIZADOR / COMITÉ ORGANIZADOR / ORGANIZING COMMITTEE**
Antonio Calvo-Manzano Ruiz (SEA)
Rosa María Cibrián (UV)
Ana Delgado Portela (SEA)
Alicia Giménez (UPV)
Luis Godhino (SPA)
José Salvador Santiago Páez (SEA)

**COMITÉ TÉCNICO-CIENTÍFICO / COMITÉ TÉCNICO-CIENTÍFICO / TECHNICAL AND SCIENTIFIC COMMITTEE**
Arturo Barba(UPV)
Salvador Cerda (UPV)
Víctor Espinosa (UPV)
Amando García García (SEA)
José Javier López Monfort (UPV)
Juan Miguel Navarro Ruiz (UCAM)
Ramón Peral Orts (UMH)
Ana Planells (UPV)
Jaime Ramis Soriano (UA)
Enrique Riera (CETF)

Víctor Sánchez Morcillo (UPV)
Jaume Segura (UV)
José Manuel Talens (UPV)
Jenaro Vera Guarinos (UA)

**ENTIDADES ORGANIZADORAS / ENTIDADES ORGANIZADORAS / ORGANIZING ENTITIES**
Sociedad Española de Acústica (SEA)
Universidat Politècnica de València (UPV)
Sociedade Portuguesa de Acústica (SPA)

**PATROCINIO INSTITUCIONAL/ PATROCÍNIO INSTITUCIONAL/ INSTITUTIONAL SPONSORHIP**
European Acoustics Asociation (EAA)
International Commission for Acoustics (ICA)

**ENTIDADES COLABORADORAS / ENTIDADES COLABORADORAS / COLLABORATING ENTITIES**
Ayuntamiento de València

**EMPRESAS COLABORADORAS / EMPRESAS COLABORADORAS / COLLABORATING COMPANIES**
AMC MECANOCAUCHO
ALAVA INGENIEROS, S.A.
AUDIOTEC INGENIERIA ACÚSTICA, S.A.
BRÜEL & KJÆR IBERICA, S.A.
CESVA INSTRUMENTS
DATAKUSTIK GMBH
ROCKWOOL PENINSULAR
SAINT-GABAIN ISOVER IBÉRICA, S.L.
SOUND OF NUMBERS, S.L.
SVANTEX ESPAÑA, S.L.

**SECRETARÍA DEL CONGRESO / SECRETARÍA DO CONGRESSO / CONGRESS SECRETARIAT**
Sociedad Española de Acústica
Serrano 144
28006 Madrid

**SEDE DEL CONGRESO / SEDE CONGRESSO / CONGRESS VENUE**
CPI – Ciudad Politécnica de la Innovación
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n – Edifico 8G – 3ª Planta
460322 Valencia

**CARTERAS CONGRESISTAS PATROCINADAS POR:**
Ayuntamiento de València

**ACTIVIDADES PARALELAS / ACTIVIDADES PARALELAS / PARALLEL ACTIVITIES**
Encuentro jovenes acusticos (YAN)
Miércoles, día 21 de octubre de 18:00 h a 20:00 h
Sede del Congreso
Cóctel patrocinado por Acústica LUZEA

**SESIONES ESTRUTURADAS / SESSÕES ESTRUCTURADAS / STRUCTURED SESSIONS**

AAM-0 Acústica Ambiental. Gestión y control del Ruido / Acústica ambiental. Gestão e controlo de ruído / Environmental Acoustics. Management and control of noise
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Ricardo Hernandez Molina y Fernando López Santos

AAM-1 Mapas Estratégicos de Ruido de 2ª ronda y Planes de Acción asociados / Mapas de Ruído da 2 ª ronda e planos de acção associados / Noise Strategic Maps of the 2nd round and associates Actions Plans
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Miguel Ausejo y Ana Espinel

AAM-2 Análisis y evaluación del ruido y vibraciones en vehículos eléctricos e híbridos / Análise e avaliação do ruído e vibrações em veículos elétricos e híbridos / Analysis and evaluation of noise and vibrations in electric and hybrid vehicles
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Ramón Peral Orts y Nuria Campillo Davó

AAM-3 Calidad sonora ambiental en las ciudades inteligentes / Qualidade sonora ambiental nas cidades inteligentes / Environmental sound quality in smart cities
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Francesc Alías Pujol y Carolina Monteiro

AAM-4 Percepción de la molestia: Confort Acústico / Percepção de desconforto: Conforto Acústico / Perception of discomfort: Acoustic Comfort
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: José Elías Arias Puga, María Ángeles Martin Bravo y Ana Isabel Tarrero

AAM-5 Ruido y vibraciones en el ambiente laboral / Ruído e vibrações em ambiente laboral / Noise and vibrations in working environments
Coordinador / Coordenador / Coordinator: Carlos César Rodrigues

AAM-6 Paisajes sonoros naturales y urbanos / Paisagens sonoras naturais e urbanas / Natural and urban soundscapes
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Miguel Arana Burgui y Ricardo Hernández Molina

AED-0 Acústica en la edificación / Acústica Arquitetónica / Acoustics in buildings
Coordinador / Coordenador / Coordinator: Ana Delgado y Alejandro Sansegundo

AED-1 La investigación en acústica de la edificación: técnicas, procedimientos y soluciones / A pesquisa em acústica do edifício: técnicas, procedimentos e soluções / The research in building acoustics: techniques, procedures and solutions
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Belén Casla Herguedas, Teresa Carrascal García y Amelia Romero Fernández

AED-2 Nuevos materiales y dispositivos acústicos / Novos materiais e dispositivos acústicos / New materials and acoustics devices
Coordinador / Coordenador / Coordinator: María Ángeles Navacerrada

AED-3 Sistemas de calidad y conformidad técnica en Laboratorios de Acústica / Sistemas de qualidade e conformidade técnica em Laboratórios Acústicos / Quality systems and technical compliance in Acoustic Laboratories
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Ana Espinel y Ángel Arenaz

AED-4 Normativa y ensayos en acústica de edificios / Os regulamentos e os ensaios em acústica do edifício / Standards and tests in building acoustics
Coordinador / Coordenador / Coordinator: María Machimbarrena

AEV-0 Acústica estructural y vibraciones. Vibroacústica / Acústica e vibrações estruturais. Vibroacústica / Structural acoustics and vibrations. Vibroacoustics
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Jaime Ramis Soriano, Paulo Amado Mendes y Luís Godinho

AFS-0 Acústica Virtual y Ambisonics / Acústica Virtual e Ambisonics / Virtual Acoustics and Ambisonics
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: José Javier López Monfort y Jaume Segura

AFS-1 Procesado de Sonido / Processamento de sinais sonoros / Processing of sound
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: José Javier López Monfort, Máximo Cobos y Juan Miguel Navarro

AFS-2 Acústica Física / Acústica Física / Physical acoustics
Coordinador / Coordenador / Coordinator: Francisco Simón Hidalgo

AMS-0 Acústica Musical / Acústica Musical / Musical acoustics
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Arturo Barba, Jaume Segura y Cristina Zamorano

ASA-0 Monitorización acústica de ecosistemas marinos / Monitoramento acústico dos ecossistemas marinhos / Acoustical monitoring of marine ecosystems
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Víctor Espìnosa y Michael Taroudakis

ASL-0 Diseño acústico de salas y acústica virtual / Projeto acústico de salas e acústica virtual / Acoustic design of rooms and virtual acoustics
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Rosa María Cibrián y Alicia Giménez

ULT-0 Ultrasonidos / Ultrassons / Ultrasound
Coordinadores / Coordenadores / Coordinators: Enrique Riera y Víctor Sánchez Morcillo




*Acústica y Vibraciones*

# *Comprometidos con la acústica*

Más de 40 años de experiencia han hecho de Álava Ingenieros una de las principales empresas del mundo en cuanto a variedad de soluciones y socios tecnológicos en este campo.

Ofrecemos la más amplia gama en Instrumentación de medida y sistemas de ensayo en el ámbito de la acústica y las vibraciones.

Ponemos a su disposición el alto grado de capacitación de nuestro equipo humano, para zsesoramiento, formación, instalación y puesta en marcha.

***Álava Ingenieros,** tecnología a su medida*

## Acústica ambiental y arquitectónica

· Sonómetros y vibrómetros
· Analizadores multicanal
· Redes de monitorización acústica
· Software de simulación acústica

## Seguridad e higiene laboral

· Dosímetros
· Medidores de vibración
· Calibradores

## Transductores y calibradores

· Excitadores de vibración
· Micrófonos e hidrófonos
· Acelerómetros
· Fuentes sonoras
· Máquinas y martillos de impacto

## Análisis avanzado

· Analizadores multicanal
· Localización de fuentes sonoras
· Calidad acústica
· Análisis estructural
· Maquinaria rotativa

## Cámaras para ensayos acústicos

· Cámaras anecoicas y semianecoicas
· Cámaras reverberantes
· Tubos de impedancias
· Cámaras portátiles

## Audio y Broadcast

· Sistemas de telefonometría
· Analizadores de calidad de audio

ALAVA INGENIEROS

**www.alavaingenieros.com**

+34 91 567 97 00 | alava@alava-ing.es

MADRID · BARCELONA · ZARAGOZA · LISBOA · LIMA · TEXAS



GRUPO ALAVA INGENIEROS

# ÍNDICE DE CONFERENCIAS Y COMUNICACIONES

## ÍNDICE DE CONFERÊNCIAS E COMUNICAÇÕES

## INDEX OF LECTURES AND PAPERS

## CONFERENCIAS PLENARIAS / CONFERÊNCIAS PLENÁRIAS / PLENARY LECTURES


C.P. 001. Ambiente acústico de/en la vivienda: Al encuentro de una visión holística Pg. 24
*Jorge Patricio*
Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC. Lisboa, Portugal

C.P. 002 Advancements in 3D Audio using Ambisonics Pg. 43
*Alois Sontacchi, Matthias Frank, Franz Zotter*
Institut für Elektronische Musik und Akustik. Universität für Musik und Darstellende Kunst. Graz, Austria

C.P. 003. Conservación y recuperación del patrimonio sonoro de la Comunidad Valenciana Pg. 54
*Alicia Giménez Pérez, Rosa Maria Cibrian*
Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de Valencia


## COMUNICACIONES / COMUNICAÇÕES / PAPERS

### AAM-0 ACÚSTICA AMBIENTAL. GESTIÓN Y CONTROL DEL RUIDO / ACÚSTICA AMBIENTAL. GESTÃO E CONTROLO DE RUÍDO / ENVIRONMENTAL ACOUSTICS. MANAGEMENT AND CONTROL OF NOISE


AAM-0 001.C.I. Propuesta y validación de una clasificación cualitativa de los espacios sonoros de un área rural Pg. 68
*L. López Uribarri, M.F. Marey Pérez, X.P. González Vázquez*

AAM-0 002. Patinillos de ventilación: Fuente de ruido y propuesta de soluciones acústicas Pg. 76
*Silvia Herranz García*

AAM-0 003. Desarrollo de software para evaluación de pérdidas por inserción Pg. 85
*Lorena de la Madrid Descalzo, José Mª. Bravo Plana-Sala, Juan Vicente Sánchez Pérez, Marcelino Ferri García*

AAM-0 004.C.I. Cálculo del nivel máximo de inmisión provocado por el ruido ferroviario Pg. 93
*Fernando López Santos*

AAM-0 006.C.I. Análisis preliminar de la relación entre urbanismo y ruido de tráfico Pg. 100
*Juan Miguel Barrigón Morillas, Guillermo Rey Gozalo, J. Trujillo Carmona, David Montes González, Pedro Atanasio Moraga, Rosendo Vílchez-Gómez, Valentín Gómez Escobar, Juan A. Méndez Sierra, Carlos Prieto-Gajardo*

AAM-0 007. Estudio morfológico de pantallas acústicas para mejora de su rendimiento estético-funcional Pg. 108
*María de la O Moreno Balboa, Ignacio Demaría Casteñeda, Laura Abad Toribio, David Colorado Aranguren, Francisco Javier Gabiola Ondarra, Ana Isabel Velasco Fernández*

AAM-0 009. Métodos de Simplificación para la Elaboración de Mapas de Ruido de ciudades Pg. 116
*Nicolás Bastián Monarca, Enrique Suárez Silva*

AAM-0 010. Elección de un modelo de Ruido de tránsito vehicular para Chile Pg. 124
*Nicolás Bastián Monarca, Juan Pablo Álvarez Rodenbeek, Enrique Suárez Silva, Andrea Báez Montenegro*

AAM-0 011. Análisis del nivel de ruido y la dosis de exposición en actividades de ocio Pg.133
*Andrea Guillem Cánovas, Mª Ángeles Martín Bravo, Ana Isabel Tarrero Fernández*

AAM-0 013. Nacional 332 a su paso por Oliva: Comparativa de 1999 y 2015 Pg. 142
*Romina del Rey Tormos, Jesús Alba Fernández, Laura Bertó Carbó, Jaime Ramis Soriano*

AAM-0 014.C.I. Detección y priorización de puntos de conflicto en la red de carreteras de Andalucía a partir de los mapas estratégicos de ruido de la 2ª fase empleando la Toolbox Garita Pg. 149
*Ricardo Gey Flores, José Luis Cueto Ancela, Ricardo Hernández Molina, Diego Sales Márquez*

AAM-0 015. Técnica no destructiva para la determinación de la rigidez dinámica de mezclas bituminosas Pg. 158
*Victoriano Fernández Vázquez, Fernando J. Terán Sierra, Francisco Paz Núñez, Pedro Huertas Gallardo, Santiago Expósito Paje*

AAM-0 016. Nuevos firmes reciclados: Generación del ruido de rodadura Pg. 166
*Francisco Paz Núñez, Fernando J. Terán Sierra, Victoriano Fernández Vázquez, Pedro Huertas Gallardo, Santiago Expósito Paje*

AAM-0 017. Evolución temporal de las características sonoras de las vías urbanas de Ciudad Real Pg. 174
*Fernando J. Terán Sierra, Francisco Paz Núñez, Victoriano Fernández Vázquez, Pedro Huertas Gallardo, Santiago Expósito Paje*

AAM-0 019.C.I. Comparativa entre la percepción ciudadana de los conflictos acústicos y los conflictos determinados del análisis del Mapa Estratégico de Ruido (MER) de la ciudad de Málaga Pg. 182
*Luis Medina-Montoya Hellgren, Fernando López Santos, David Carretero de la Rocha, Isabel Giménez Anaya*

AAM-0 020.C.I. Aspectos acústicos en el diseño de espacios exteriores específicos para personas con autismo Pg. 191
*Valentín Martín Fanjul, Francesc Daumal i Domènech*

AAM-0 021. Control de ruido en conductos de aire, mediante micro-estructuras Pg. 198
*Marcelo Herrera Martínez, Huérfano Alvarado, John Freddy*

AAM-0 022. Efectos en la priorización de autobuses en intersecciones sobre el ruido urbano Pg. 206
*Jose Luis Cueto, Ricardo Hernandez Molina, Diego Sales, Ricardo Gey, Diego Sales (Jr. ), Javier Priego, Alina Petrovici*

AAM-0 023.C.I. Caracterización de emisores acústicos industriales y estrategias de optimización en emplazamientos industriales Pg. 214
*Antonio Notario Tévar*

AAM-0 024. Mejora de la eficacia en la evaluación de componentes de baja frecuencia Pg. 222
*Robert Barti Domingo*

AAM-0 025. Incerteza de amostragem nas medições de ruído ambiental. Influência

na precisão dos indicadores de longa duração, quando obtidos a partir de medições de curta duração Pg. 231
*Mário Mateus, João A. Dias Carrilho, Manuel C. Gameiro da Silva*

AAM-0 026. Propuestas de procedimientos para el análisis temporal de larga duración de parámetros acústicos aplicados al ruido de tráfico Pg. 239
*Enrique Ezpeleta Bielsa, Juan Miguel Navarro Ruiz*

AAM-0 027.C.I. Acoustic impact assessment of wind farms in Spain: The new approach of the Andalusian regulation Pg. 249
*Álvaro Grilo Bensusan*

AAM-0 028. The Dynamap Life+ project: a low cost noise monitoring network for automatic real time noise mapping Pg. 257
*Luca Nencini, Joan Claudi Socoró Carrié*

**AAM-1 MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO DE 2ª RONDA Y PLANES DE ACCIÓN ASOCIADOS /**
**MAPAS DE RUÍDO DA 2 ª RONDA E PLANOS DE ACÇÃO ASSOCIADOS /**
**NOISE STRATEGIC MAPS OF THE 2ND ROUND AND ASSOCIATES ACTIONS PLANS**

AAM-1 001.C.I. Publicación de Mapas Estratégicos de Ruido en Plataforma de Mapas de Ruido Online Pg. 261
*Antonio Notario Tévar*

AAM-1 002.C.I. Caso práctico de elaboración de mapas estratégicos de ruido en municipios de pequeño tamaño englobados en un único proyecto Pg. 269
*Ana Esther Espinel Valdivieso, Jose Ignacio Riesco García, Miguel Ausejo Prieto, Sara Herranz Pedriza, Gema Sánchez. Gozalo, Mari Paz Rodriguez Pérez, Azucena de la Cruz Lecanda*

AAM-1 003.C.I. Mapas estratégicos de Ruído de 2ª FASE na Concessão Brisa Pg. 277
*Margarida Braga, Teresa Claro*

AAM-1 004.C.I. Mapas Estratégicos de Ruidos de Carreteras Fase 1 vs Fase 2 Pg. 285
*Fernando López Santos, David Carretero de la Rocha, Isabel Giménez Anaya*

AAM-1 005. Presentación de resultados de la 2ª fase de los mapas estratégicos de ruidos de la red de carreteras de Andalucía Pg. 294
*Ricardo Gey Flores, José Luis Cueto Ancela, Ricardo Hernández Molina, Diego Sales Márquez*

**AAM-2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RUIDO Y VIBRACIONES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS /**
**ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO RUÍDO E VIBRAÇÕES EM VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS /**
**ANALYSIS AND EVALUATION OF NOISE AND VIBRATIONS IN ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES**

AAM-2 002. On the use of the BEM to study the noise emitted by circulating EVs or HVs in urban environment Pg. 303
*Alba Sánchez-Milan, Jesus Carbajo, Luís Godinho, Ramon Peral-Orts, Jaime Ramis-Soriano*

AAM-2 003.C.I. Sound effect due to electric vehicles in the noise maps Pg. 311
*Héctor Campello Vicent, Ramón Peral Orts, Nuria Campillo Davó, Emilio Velasco Sánchez*

AAM-2 004.C.I. Analysis and detectability in urban environments of AVAS for EVs and HEVs Pg. 318
*Pedro Poveda Martínez, Jaime Ramis Soriano, Salvador Ivorra, Ramón Peral Orts, Nuria Campillo, Miguel Sánchez, Luis Godinho, Andreia Ferreira, Paulo A. Mendes, Juan M. Barrigón*

AAM-2 005. Sound approval test for electric vehicles: Results of pass-by tests Pg. 327
*Nuria Campillo Davó, Héctor Campello Vicente, Ramón Peral Orts, Pedro Poveda, Jaime Ramis*

AAM-2 006. Metodologías de muestreo para el diseño de señales de advertencia en vehículos eléctricos Pg. 334
*Juan Miguel Barrigón Morillas, Pedro Poveda Martínez, Ramón Peral Orts, Jaime Ramis Soriano*

AAM-2 008. Ensaio de ruído e vibrações, no interior do habitáculo de um veículo ligeiro de passageiros Pg. 345
*Mário Mateus, João A. Dias Carrilho, Manuel C. Gameiro da Silva*

**AAM-3 CALIDAD SONORA AMBIENTAL EN LAS CIUDADES INTELIGENTES / QUALIDADE SONORA AMBIENTAL NAS CIDADES INTELIGENTES / ENVIRONMENTAL SOUND QUALITY IN SMART CITIES**

AAM-3 001.C.I. Creación de un prototipo de sensor acústico conectado de bajo coste para el análisis del campo sonoro Pg. 351
*Juan Emilio Noriega Linares, Juan Miguel Navarro Ruiz*

AAM-3 002.C.I. Training an anomalous noise event detection algorithm for dynamic road traffic noise mapping: environmental noise recording campaign Pg. 361
*Francesc Alías, Joan Claudi Socoró, Xavier Sevillano, Luca Nencini*

AAM-3 003. Valencia ciudad inteligente: Control de la calidad acústica Pg. 369
*Ana Viciano Pastor*

AAM-3 006. Framework to Monitor sound events in the city supported by the fiware platform Pg. 387
*Joel Preto Paulo, Pedro Fazenda, Tiago Oliveira, Carlos Carvalho*

AAM-3 007.C.I. Tercer aniversario (2015) del Día Mundial del Sonido. Un análisis reflexivo sobre la ética del sonido en las futuras smarts cities Pg. 397
*Maria Luisa Luceño Ramos, Francesc Daumal i Domènech, Josep Cerdà Ferre, Alicia Giménez Pérez, Fausto Rodríguez Manzo*

**AAM-4 PERCEPCIÓN DE LA MOLESTIA: CONFORT ACÚSTICO / PERCEPÇÃO DE DESCONFORTO: CONFORTO ACÚSTICO / PERCEPTION OF DISCOMFORT: ACOUSTIC COMFORT**

AAM-4 001. Concienciación e implicación ciudadana en la lucha contra el ruido del ocio en Málaga Pg. 406
*Luis Medina-Montoya, Antonio J. Ruiz, Aitor H. Castillo, Juan Manuel López, Jesús Alonso, César Asensio*

AAM-4 003. Salud urbana y ruido Pg. 415
*Jimena de Gortari*

AAM-4 004.C.I. Constatações e sugestões para melhorar o conforto e a inteligibilidade acústica para os usuários do aeroporto Tom Jobim, RJ/Brasil Pg. 421
*Maria Lúcia Grillo, Luiz Roberto Baptista, Jeanne Denise Barros*

AAM-4 005. Enseñanza-aprendizaje sobre acústica en la carrera de arquitecto: electiva sonido y habitat Pg. 4129
*Beatriz Garzón, Elisa Soldati, Leonardo Paterlini, Virginia Soler Legname, Jorge Negrete*

AAM-4 006.C.I. Variables objetivas y subjetivas en la evaluación del ruido en parques y jardines Pg. 438
*Ignacio Demaría Casteñeda, David Colorado Aranguren, Laura Abad Toribio, Francisco Javier Gabiola Ondarra*

AAM-4 007.C.I. Consideraciones para el confort acústico en las personas con trastornos del espectro autista Pg. 446
*Francesc Daumal i Domènech, Valentín Martín Fanjul*

AAM-4 008. Uso del contraste acústico para evaluar la molestia percibida por el ruido Pg. 454
*Robert Barti*

AAM-4 009. ACÚSTICA "FORA DA LEI". Casos exemplares de desconforto acústico não integrado nos limites acústicos legais Pg. 462
*Vitor Rosão*

AAM-4 010.C.I. Medio siglo en la acústica del museo nacional de antropología de la Ciudad de México. El sonido del Arquitecto Pedro Ramírez Vázquez Pg. 470
*Patricia Torres Sánchez, Francesc Daumal i Domènech, Fernando Ramos Galino*

AAM-4 011.C.I. Percepción de la calidad acústica de parques y jardines Pg. 479
*Juan M. Barrigón-Morillas, Carmen Venegas-Jiménez, Diego Medina-Bonilla, Juan A. Méndez-Sierra, Pedro Atanasio-Moraga, Guillermo Rey-Gozalo, Rosendo Vílchez-Gómez, Rubén Maderuelo-Sanz*

AAM-4 013. Conforto acústico: A percepção do utilizador comum Pg. 487
*André Guerreiro, Carlos César Rodrigues*

**AAM-5 RUIDO Y VIBRACIONES EN EL AMBIENTE LABORAL /**
**UÍDO E VIBRAÇÕES EM AMBIENTE LABORAL /**
**NOISE AND VIBRATIONS IN WORKING ENVIRONMENTS**

AAM-5 002.C.I. Structural analysis and control of vibrating hoppers for harvested grapes in a wine cellar. A case study Pg. 493
*Vincent Debut, Octávio Inácio*

AAM-5 003.C.I. Avaliação de incomodidade devido a vibrações - Comparação de Criterios Pg. 502
*Carlos Aroeira*

AAM-5 004. Selecção de protectores auditivos - sonómetros vs. dosímetros de ruído Pg. 511
*João António de Matos, Pedro Alexandre Rosa, Carlos César Rodrigues*

AAM-5-005.C.I. Ensaio de aptidão - ruído laboral Pg. 518
*Jorge Fradique, Fátima Inglês*

AAM-5 006.C.I. Ensaios de ruído ocupacional - sensibilizar, educar e formar Pg. 532
*Virgínia C. Gomes; Carlos César Rodrigues*

**AAM-6 PAISAJES SONOROS NATURALES Y URBANOS /**
**PAISAGENS SONORAS NATURAIS E URBANAS /**
**NATURAL AND URBAN SOUNDSCAPES**

AAM-6 001.C.I. El paisaje sonoro urbano. Intrusiones y percepciones Pg. 539
*Pedro Atanasio Moraga, Juan M. Barrigón-Morillas, Guillermo Rey-Gozalo, David Montes-González, Carlos Prieto-Gajardo*

AAM-6 002.C.I. Estudio de paisaje sonoro en Valdivia, Chile Pg. 547
*Enrique Suárez Silva, Jorge Cárdenas Mansilla*

AAM-6 003.C.I. Valorización acústica de espacios verdes en Valdivia, Chile Pg. 555
*Enrique Suárez Silva, Olga Barbosa Prieto*

AAM-6 005. Paisajes sonoros en San Miguel de Tucumán, Argentina: Investigación y transferencia para su concienciación Pg. 563
*Beatriz Garzón, Elisa Soldati, Leonardo Paterlini, Sofía Perera, Miguel Rufino, Marcia Orellana, Florencia Ponce*

AAM-6 006. Estudio de la calidad acústica en una pequeña localidad de Extremadura: Herreruela, Cáceres, España Pg. 571
*Mª del Carmen Sierra-Limpo, Juan A. Méndez-Sierra, Juan M. Barrigón-Morillas, Rosendo Vílchez-Gómez, Carlos Prieto-Gajardo, Guillermo Rey-Gozalo, David Montes-González, Pedro Atanasio-Moraga*

AAM-6 007.C.I. La sonoridad de los espacios públicos. Barcelona-Ciudad de México Pg. 579
*Jimena de Gortari, Francesc Daumal i Domenèch*

**AED-0 ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN /
ACÚSTICA ARQUITETÓNICA /
ACOUSTICS IN BUILDINGS**

AED-0 001.C.I. Nuevas formas de colocación del aislamiento acústico Pg. 588
*Penélope González de la Peña*

AED-0 002. Alvenaria de blocos cerâmicos com placas de gesso acartonado: Estudo comparativo de isolamento acústico Pg. 596
*Sérgio Klipell Filho, Josiane Reschke Pires, Maria Fernanda de O. Nunes*

AED-0 003. Caracterização Acústica de grandes centros comerciais Pg. 603
*António P. O. Carvalho, Cláudia F. R. T. Pereira*

AED-0 004. Solução combinada de subcamadas de aglomerados de cortiça para sistemas duplos de laje e pavimento flutuantes Pg. 611
*António P. O. Carvalho; Carolina R. G. Mateus; Marina I. N. Rodrigues*

AED-0 005.C.I. Comportamiento acústico de sistemas de rehabilitación por el exterior de la fachada Pg. 619
*Carlos Rodero Antunez*

AED-0 006.C.I. El IEE como elemento desencadenante de la rehabilitación Pg. 633
*Luis Vega Catalán, Teresa Carrascal, Amelia Romero, Belén Casla*

AED-0 007. Condiciones acústicas en bares-restaurantes: Una primera aproximación al establecimiento de la "distancia mínima de confort" entre mesas Pg. 639
*Marisol Yebra Calleja, Jenaro Vera Guarinos, Eva Calzado Estepa, Francisco Brocal Fernández, Albert Marí Ribas*

AED-0 008. Isolamento acústico e resistência ao fogo de alvenarias com argamassa polimérica Pg. 650
*Fernanda Pacheco, Roberto Christ, Maria Fernanda de O. Nunes*

AED-0 009.C.I. Soluciones de alta eficiencia acústica para medianerias y elementos

de separacion vertical Pg. 658
*Fernando Peinado Hernández, Nicolás Bermejo Presa, Adolfo Somolinos Orejón, Alberto Rubio Benito*

AED-0 010.C.I. Técnicas modernas para la optimización acústica de oficinas abiertas Pg. 666
*Antonio Notario Tévar*

AED-0 011.C.I. Propuestas de soluciones ligeras para aislamiento acústico basadas en nanofibras y green composites Pg. 674
*Romina del Rey, Jesús Alba, Ana Llopis, Ignacio Guillén*

AED-0 013.C.I. Isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, análise de resultados obtidos in situ Pg. 682
*Helder Miguel Gonçalves Martins, Marco Antunes Mateus, Carlos César Rodrigues*

**AED-1 LA INVESTIGACIÓN EN ACÚSTICA DE LA EDIFICACIÓN: TÉCNICAS, PROCEDIMIENTOS Y SOLUCIONES /**
**A PESQUISA EM ACÚSTICA DO EDIFÍCIO: TÉCNICAS, PROCEDIMENTOS E SOLUÇÕES / THE RESEARCH IN BUILDING ACOUSTICS: TECHNIQUES, PROCEDURES AND SOLUTIONS**

AED-1 001.C.I. Uso de técnicas de medida de nivel de velocidad de vibración y SolidNoiseTM en la evaluación de cámaras acústicas de transmisión sonora Pg. 689
*Amelia Romero Fernández, Roberto San Millán-Castillo, Salvador Domingo Bets, Belén Casla Herguedas, Borja Frutos Vázquez, Manuel Olaya Adán, Ignacio Pavón García*

AED-1 002.C.I. Evolución de una sonda de vibraciones para simplificar la evaluación de transmisión sonora por flancos entre recintos Pg. 699
*Roberto San Millán-Castillo, Salvador Domingo, Ignacio Pavón*

AED-1 003.C.I. Ruido de impactos, nuevas herramientas teóricas y prácticas Pg. 709
*Manuel Taborga Pérez, Salvador Domingo Bets*

AED-1 005.C.I. Verificación y optimización de calidad acústica en edificación mediante software Pg. 716
*Cástor Rodríguez Fernández*

AED-1 006.C.I. Absorción acústica de materiales textiles en recintos de culto Pg. 724
*L. Álvarez-Morales, A. Alonso, S. Girón, M. Galindo, R. Suárez, J.J. Sendra, A. Giménez*

AED-1 007. Arquitetura, acústica e liturgia: Avaliação e proposta acústica da Concatedral Nossa Senhora do Bom Conselho em Arapiraca-Al Pg. 732
*Elizabeth de A. C. Duarte, Camila Cavalcante Alécio*

**AED-2 NUEVOS MATERIALES Y DISPOSITIVOS ACÚSTICOS /**
**NOVOS MATERIAIS E DISPOSITIVOS ACÚSTICOS /**
**NEW MATERIALS AND ACOUSTICS DEVICES**

AED-2 001.C.I. Determinación de la porosidad tortuosidad y resistencia al flujo en fibras recicladas procedentes de neumáticos fuera de uso Pg. 743
*M. Zamorano Cantó, J. Segura Alcaraz, A.V. Nadal Gisbert, J.E. Crespo Amorós*

AED-2 002.C.I. Lana de oveja: Una alternativa natural para la absorción sonora Pg. 751

*Jesús Alba, Romina del Rey, Antonio Uris, Pilar Candelas*

AED-2 006. Estudo da influência do material constituinte no desempenho de difusores QRD Pg. 759
*Ricardo Patraquim, Santos Pedro Gil, Luís Godinho, Amado, Paulo Mendes, Diogo Mateus*

AED-2 007.C.I. Estudio objetivo y subjetivo del efecto de los difusores basados en cristales de sonido Pg. 767
*Alberto Quintana Gallardo, Blanca Hervás Zafra, Iluminada Pérez Troya, Juan Vicente Sánchez Pérez, Francisco Javier Redondo Pastor*

AED-2 008.C.I. Cualificación acústica de una cámara de transmisión vertical de dimensiones reducidas Pg. 776
*Mª Ángeles Navacerrada, Antonio Pedrero, Marta Fernández, César Díaz Sanchidrian*

AED-2 009.C.I. Diseño de un sensor Acústico - piezoeléctrico con encapsulado metálico Pg. 784
*J. Barreiro, A. Sáenz de Inestrillas, F. Camarena*

AED-2 010. Validación de aplicaciones de móviles para la medición del ruido Pg. 792
*Álvaro O. Rubio-García, Rosendo Vílchez-Gómez, Juan A. Méndez-Sierra, Juan M. Barrigón-Morillas, Carlos Prieto-Gajardo, Guillermo Rey-Gozalo, David Montes-González, Pedro Atanasio-Moraga*

AED-2 011.C.I. Uso de ordenamientos cuasi-fractales para la mejora del rendimiento acústico de pantallas basadas en conjuntos de dispersores rígidos aislados Pg. 800
*S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J.V. Sánchez-Pérez*

AED-2 012. Modelado del comportamiento acústico de catalizadores cónicos mediante colocación puntual Pg. 806
*F.D. Denia, E.M. Sánchez-Orgaz, J. Carballeira, F.J. Fuenmayor*

AED-2 013. Cajas acústicas y altoparlantes construidos a partir de madera de Kranthout Pg. 819
*Marcelo Herrera Martínez, María Fernanda Reyes*

AED-2 014. Absorción acústica de hormigón perforado Pg. 825
*Jesús Carbajo, Tomás Vicente Esquerdo, Antonio Vicente Nadal-Gisbert, Francisco David Denia, Jaime Ramis Soriano*

AED-2 016. Desarrollo e innovación de membranas acústicas proyectadas in situ Pg. 836
*Ana Espinel Valdivieso, Miguel Ausejo Prieto, Ismael Sanz Mata*

**AED-3 SISTEMAS DE CALIDAD Y CONFORMIDAD TÉCNICA EN LABORATORIOS DE ACÚSTICA /**
**SISTEMAS DE QUALIDADE E CONFORMIDADE TÉCNICA EM LABORATÓRIOS ACÚSTICOS /**
**QUALITY SYSTEMS AND TECHNICAL COMPLIANCE IN ACOUSTIC LABORATORIES**

AED-3 001.C.I. La verificación de las fuentes sonoras en la acreditación de laboratorios de ensayos acústicos Pg. 842
*Antonio Pedrero González, José Luis Sánchez Bote, César Díaz Sanchidrián, María de los Ángeles Navacerrada Saturio*

AED-3 002.C.I. Métodos de evaluación por el proveedor de la calidad de los resultados

de un ejercicio de intercomparación Pg. 850
*Ana Espinel; Sonsoles Gomez; Angel Arenaz; Miguel Ausejo*

AED-3 003.C.I. Criterios de aplicación de la nueva revisión de la NT-45 de ENAC para Laboratorios acreditados Pg. 859
*Carmen Carro Rejas*

AED-3 004.C.I. Control, logística y mantenimiento de infraestructuras e items en programas de intercomparación acústica Pg. 867
*Ana Espinel Valdivieso, Daniel Bravo Arranz, Miguel Ausejo Prieto, Angel Arenaz Gombau*

**AED-4 NORMATIVA Y ENSAYOS EN ACÚSTICA DE EDIFICIOS / OS REGULAMENTOS E OS ENSAIOS EM ACÚSTICA DO EDIFÍCIO / STANDARDS AND TESTS IN BUILDING ACOUSTICS**

AED-4 001.C.I. Optimización de la configuración de la medida del campo acústico en recintos a baja frecuencia Pg. 874
*David K. Anthony, Francisco Simón*

AED-4 002. Influencia do alargamento da gama de frequências na determinação dos índices de isolamento sonoro e na respetiva incerteza Pg. 882
*Diogo M. R. Mateus, Julieta M. P. António*

AED-4 003. Determinación del DNTW (50-5000) de un sistema constructivo. Propuesta de un método alternativo basado en la ASTM E1322-90 Pg. 890
*Jenaro Vera Guarinos, Marisol Yebra Calleja, Eva Calzado Estepa*

AED-4 004.C.I. Determinación de la incertidumbre en medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo: Ejemplo de aplicación a un gran número de datos Pg. 903
*María Machimbarrena, Carolina Rodrigues A. Monteiro, Reine Johansson, Stefano Pedersoli, Sean Smith*

AED-4 005.C.I. Análisis de los datos de precisión en la medida del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancias Pg. 912
*Juan Sancho Gil, Héctor Arnay Sarabia, Patricia Hrelja González*

AED-4 006.C.I. La ausencia de una norma sobre aislamiento acústico en las edificaciones en la ciudad de México. El caso de una institución educativa Pg. 920
*Fausto Rodríguez-Manzo, Dulce R. Ponce-Patrón, Silvia G. García-Martínez, Elisa Garay-Vargas, Laura A. Lancón-Rivera*

AED-4 007.C.I. Las lanas minerales y el DB-HR Pg. 928
*Fernando Peinado Hernández, Nicolás Bermejo Presa*

AED-4 008.C.I. Condiciones de habitabilidad y rehabilitación acústica en la vivienda social de la posguerra española Pg. 936
*Marta Monzón, Francesc Daumal, Belinda López-Mesa*

AED-4 009. Avaliação acústica de edifícios em Portugal: Responsáveis e responsabilidades Pg. 946
*R. J. F. Pereira, Carlos César Rodrigues*

**AEV-0 ACÚSTICA ESTRUCTURAL Y VIBRACIONES. VIBROACÚSTICA / ACÚSTICA E VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS. VIBROACÚSTICA / STRUCTURAL ACOUSTICS AND VIBRATIONS. VIBROACOUSTICS**

AEV-0 001.C.I. Simulación por el FEM de la transmisión del ruido de impacto en suelos pesados Pg. 953

*Jesús Magdaleno, Mª Ángeles Martín Bravo, José Mª. García Terán, Ana Isabel Tarrero*

AEV-0 002. Control de Vibraciones de Equipamiento Mecánico en Recintos Críticos Pg. 961
*Nicolás Bastián Monarca*

AEV-0 003.C.I. Avaliação da influência de vibrações ambientais na estrutura de edifícios antigos - Dois casos de estudo Pg. 969
*Diogo Mateus, Telmo Dias Pereira*

AEV-0 004.C.I. Análisis de mecanismos de extracción térmica en altavoces de baja frecuencia Pg. 977
*Jaime Ramis, Jose Martínez, Enrique G. Segovia, Jesús Carbajo*

AEV-0 006.C.I. On the use of a 3d ACA-BEM model to tackle traffic noise and EV warning sounds propagation problems Pg. 983
*P. Amado-Mendes; L. Godinho; P. G. Santos; J. Carbajo; J. Ramis*

AEV-0 008. Sistema de aislamiento intercambiable para base de edificios Pg. 992
*Michael Vanstraelen, Paulo Almeida Pinto*

AEV-0 009. Validación de modelos FEM para transmisión de vibraciones en barras en L Pg. 998
*Jesús Magdaleno, Enrique Segovia, Jaime Ramis, Mª Ángeles Martín Bravo*

**AFS-0 ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS /**
**ACÚSTICA VIRTUAL E AMBISONICS /**
**VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS**

P.I. 001 Unique ambisonic sounds of the oldest forest in Europe and the problem of silence recording Pg. 1.006
*Jerzy Wiciak, Pawel Malecki*

AFS-0 001. Implementación de un sistema Wave Field Synthesis (WFS) sobre nodos acústicos distribuidos Pg. 1.013
*Mihaita Lupoiu, Jose A. Belloch, Enrique S. Quintana-Ortí, Alberto Gonzalez, Antonio M. Vidal*

AFS-0 002.C.I. Combining Spatial Reproduction Techniques for Room Acoustic Auralization Pg. 1.021
*Michael Kohnen, Sönke Pelzer, Lukas Aspöck, Michael Vorländer*

AFS-0 003.C.I. Spherical harmonics representation of the sound field in a room based on finite element simulations Pg. 1.029
*D. M. Murillo, F. M Fazi, R. J. Astley*

AFS-0 004.C.I. Listener tracking stereo for object based audio reproduction Pg. 1.041
*Marcos Felipe Simón Gálvez, Dylan Menzies, Filippo Maria Fazi, Teofilo de Campos, Adrian Hilton*

AFS-0 005.C.I. Influencia de la calidad de los auriculares en la percepción espacial Sonora Pg. 1.049
*Pablo Gutiérrez-Parera, José J. López, Emanuel Aguilera*

AFS-0 006.C.I. Spatial Reproduction of Near Sources at Low frequencies using Dynamic Panning Pg. 1.057
*Dylan Menzies, Filippo Maria Fazi*

**AFS-1 PROCESADO DE SONIDO /**
**PROCESSAMENTO DE SINAIS SONOROS /**
**PROCESSING OF SOUND**


AFS-1 001. Conversor Audio-In MIDI-Out en tiempo real Pg. 1.064
*Xavier Bañuls Juan, Germán Ramos Peinado*

AFS-1 002. Diseño y construcción de un ecualizador gráfico de 8 bandas Pg. 1.074
*William Romo, Marcelo Herrera Martínez*

AFS-1 003. Diseño y construcción de un subkick para realzar frecuencias bajas de un bombo de batería Pg. 1.082
*William Romo, Marcelo Herra Martínez*

AFS-1 004. Diseño de array microfónico e implementación de algoritmos para localización de fuentes acústicas Pg. 1.090
*Jorge Machín, Guillermo Arana, Ricardo San Martín, Miguel Arana*

AFS-1 005.C.I. Array de micrófonos modular de propósito general para la captura y procesado de audio espacial Pg. 1.098
*Jesus Lopez-Ballester, Maximo Cobos, Juan J. Perez-Solano, Gabriel Moreno, Jaume Segura*

AFS-1 006.C.I. Subwoofer array simmulation and optimization tool Pg. 1.105
*Alvaro Saenz de Inestrillas, German Ramos, Francisco Javier Redondo*

AFS-1 007.C.I. Desarrollo de una herramienta Matlab para la reproducción de audio espacial en tiempo real Pg. 1.115
*Maximo Cobos, Gabriel Moreno, Jesus Lopez-Ballester, Pablo Gutierrez-Parera, Irene Martin-Morato, Jaume Segura, Ana M. Torres*

AFS-1 008.C.I. Simulador de redes de sensores acústicos para aplicaciones de control de campo sonoro Pg. 1.125
*Christian Antoñanzas, Juan Estreder, Miguel Ferrer, Alberto Gonzalez*

AFS-1 009.C.I. Gestor de aplicaciones de procesado de sonido sobre Android para la creación de redes de nodos acústicos con dispositivos comerciales Pg. 1.133
*Juan Estreder, Christian Antoñanzas, Gema Piñero, María de Diego*

AFS-1 010.C.I. Aceleración del modelo de la ecuación de difusión acústica mediante unidad de procesamiento gráfico (GPU) Pg. 1.142
*Juan Miguel Navarro Ruiz, Baldomero Imbernón, José María Cecilia*

AFS-1 011.C.I. Mejoras y preferencias de los usuarios en la auralización para sistemas de multiconferencia utilizando sonido binaural Pg. 1.151
*Emanuel Aguilera, Jose Javier Lopez, Pablo Gutierrez-Parera*

AFS-1 012. Desarrollo de herramienta software para la realización de Test de audición con ruido Pg. 1.157
*Josep Rodríguez, Miguel Ferrer, Gema Piñero, María de Diego*


**AFS-2 ACÚSTICA FÍSICA /**
**ACÚSTICA FÍSICA /**
**PHYSICAL ACOUSTICS**


AFS-2 001. Caracterización de estructuras con accesibilidad restringida mediante modelos SEA Pg. 1.167
*Marcos Chimeno Manguán, María José Fernández de las Heras, Elena Roibás Millán, Francisco Simón Hidalgo*

AFS-2 002. Influencia del acoplo fluido-estructura en la respuesta modal de un campo acústico Pg. 1.175
*Javier Tejado Mata, Francisco Simón Hidalgo*

**AMS-0 ACÚSTICA MUSICAL /
ACÚSTICA MUSICAL /
MUSICAL ACOUSTICS**

AMS-0 001.C.I. Influencia de los materiales de construcción en los orificios de octava del oboe Pg. 1.181
*C. Blasco-Yepes, M.T. Sala Milvaques, I. Navalón Sala*

AMS-0 002.C.I. Cañas de oboe de fabricación propia: Respuesta subjetiva de los oyentes Pg. 1.192
*Jesús Alba, Romina del Rey, Juan Pedro Romero*

AMS-0 003. Estudio de la influencia de la masa dinámica del transpositor de un 'trombón de varas' en función de su espectro de impedancia acústica Pg. 1.200
*Juan Carlos Esteve Rico, Jenaro Vera Guarinos*

AMS-0 004. Análisis comparativo de la impedancia acústica del p-bone (plastic trombone) frente a otros trombones de su misma tesitura fabricados en metal Pg. 1.213
*Juan Carlos Esteve Rico, Jenaro Vera Guarinos*

AMS-0 005. Estudio de la calidad sonora del flabiol y la dolçaina Pg. 1.226
*Pedro Poveda Martínez, Jaime Ramis Soriano*

AMS-0 006.C.I. Os efeitos acústicos dos aerofones madeiras na orquestra sinfônica Pg. 1.234
*Maria Lúcia Grillo, Luiz Roberto Baptista, Luiz Puginelli Brandão*

AMS-0 008.C.I. Análisis espectral del sonido obtenido con tudeles de oboe fabricados con diferentes materiales Pg. 1.242
*I. Navalón Sala, M.T. Sala Milvaques, C. Blasco-Yepes, S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J.V. Sánchez-Pérez*

AMS-0 009. Influencia de la geometría del tudel de oboe en la calidad tímbrica Pg. 1.253
*Sergio Castiñeira-Ibáñez, Constanza Rubio, Juan Vicente Sánchez-Pérez, J. Fuster Palmer*

AMS-0 010.C.I. Tuning of transient-excited musical instruments through optimized structural modification and modal techniques Pg. 1.259
*Miguel Carvalho, José Antunes, Vincent Debut*

**ASA-0 MONITORIZACIÓN ACÚSTICA DE ECOSISTEMAS MARINOS /
MONITORAMENTO ACÚSTICO DOS ECOSSISTEMAS MARINHOS /
ACOUSTICAL MONITORING OF MARINE ECOSYSTEMS**

ASA-0 003.C.I. Gestión de la contaminación acústica: estudios de impacto acústico submarino a través de modelizaciones Pg. 1.268
*N. Pérez Gimeno, J.F. Martínez Aragón, J.L. Cueto Ancela, R. Hernández Molina*

ASA-0 004.C.I. Caracterización y patrones de evolución del ruido medioambiental submarino en un entorno de aguas poco profundas en el Mar Mediterráneo Pg. 1.276
*Antonio Sánchez García, Francisco Javier Rodrigo Saura*

ASA-0 006 C.I. Calibración de los parámetros del modelo de directividad de los

transductores de la Ecosonda Simrad EK60 Pg. 1.285
*Pilar Córdoba Selles, María del Carmen Clemente Medina, Magdalena Iglesias Marroig, Enrique Nava Baro, Joan Miquel Batle*

ASA-0 007.C.I. El uso de ecuaciones específicas de conversión TS-talla para la estima de la biomasa de peces en balsas de acuicultura someras mediante métodos acústicos Pg. 1.293
*Victoria Rodríguez Sánchez; Lourdes Encina Amadora Rodríguez Ruiz, Carlos Orduna Martín, Juan Ramón Cid Quintero, María del Mar Barrios Galán, Myriam Retamero Coro, Macarena Algarín Ojeda*

ASA-0 008.C.I. Uso de ecosondas científicas para la estimación de la talla de peces a cortas distancias Pg. 1.300
*Ester Soliveres, Vicente Puig, Patricia Ordóñez, Vicente D. Estruch, Isabel Pérez-Arjona, Víctor Espinosa*

ASA-0 009.C.I. Caracterización del target strength de granos de piensos comerciales para acuicultura mediante ecosondas monohaz y de haz partido Pg. 1.308
*Susana Llorens, Isabel Pérez-Arjona, Ester Soliveres, Patricia Ordóñez, Vicent Puig, Víctor Espinosa*

ASA-0 010.C.I. Estimación de TS y discriminación acústica de túnidos asociados a FAD Pg. 1.316
*Guillermo Boyra, Gala Moreno*

ASA-0 011.C.I. Evaluación del Target Stregth de juveniles de atún rojo (Thunnus thynnus) en jaulas marinas Pg. 1.324
*Vicente Puig, Ester Soliveres, Patricia Ordoñez, Víctor Espinosa, Isabel Perez, Fernando de la Gándara, Vicent Estruch, Lucio Calise*

ASA-0 012.C.I. Análisis automático de señales de atún de sonares de largo alcance a bordo de buques pesqueros Pg. 1.332
*Jon Uranga, Haritz Arrizabalaga, Guillermo Boyra, Maria Carmen Hernandez*

ASA-0 013.C.I. Estimación acústica de las abundancias del plancton e ictiofauna pelágicos en el golfo de Bizkaia Pg. 1.341
*Beatriz Sobradillo Benguria*

ASA-0 015.C.I. Acoustic beacon for the positioning system of the underwater neutrino telescope KM3NeT Pg. 1.322
*M. Saldaña; M. Ardid, I. Felis, C.D Llorens, J. A. Martínez-Mora*

**ASL-0 DISEÑO ACÚSTICO DE SALAS Y ACÚSTICA VIRTUAL / PROJETO ACÚSTICO DE SALAS E ACÚSTICA VIRTUAL / ACOUSTIC DESIGN OF ROOMS AND VIRTUAL ACOUSTICS**

ASL-0 001.C.I. Salas capitulares. Auditorios medievales Pg. 1.360
*Genaro Gonzalez Baixauli*

ASL-0 002.C.I. Simulación de la variación del factor de mérito global en aulas universitarias en función de su grado de ocupación Pg. 1.366
*Francisco Sanchis Mullor, Ana LLopis Reyna, Ignacio Guillén Guillamón, Vicente Gómez Lozano*

ASL-0 003.C.I. Utilización de herramientas de simulación acústica para interiores para la modelización de espacios abiertos con características singulares. Experiencia del viaducto en la Plaza Rekalde de Bilbao. Pg. 1.374
*Alvaro Santander Pantioso, Igone García Pérez, Itziar Aspuru Soloaga,*

*Karmele Herranz Pascual, Fran Viñez, María Teresa Bustamante Fernández*

ASL-0 004.C.I. Análisis de la respuesta acústica de la Capilla de San Francisco de Asís en Azcapotzalco, México: estudio del impacto que causaron las intervenciones arquitectónicas Pg. 1.382
*Fausto E. Rodríguez Manzo, Laura A. Lancón Rivera, Elisa Garay Vargas, Silvia G. García Martínez, Dulce R. Ponce Patrón*

ASL-0 005.C.I. La acústica de las iglesias prerrománicas hispanas en su estado primitivo Pg. 1.389
*Antonio Pedrero González, César Díaz Sanchidrián, Alexander Díaz-Chyla, María de los Ángeles Navacerrada Saturio*

ASL-0 006.C.I. Diseño Acústico de la Sala Promoción CSI-IDEA en Alhaurín de la Torre, Málaga Pg. 1.397
*Pablo J. Atienza Jiménez, Juan M. Blázquez Martín*

ASL-0 007.C.I. Replanteando viejos paradigmas relacionados con el acondicionamiento acústico en recintos básicos: ¿tiempo de reverberación de saturación? ¿tiempo de reverberación óptimo? Pg. 1.405
*Jenaro Vera Guarinos, Marisol Yebra Calleja, Eva Calzado Estepa, Juan Carlos Esteve Rico*

ASL-0 008.C.I. Estimación del campo directo "vs." campo reverberante en un recinto de pública concurrencia de tamaño medio Pg. 1.413
*Jenaro Vera Guarinos, Marisol Yebra Calleja, Eva Calzado Estepa, Juan Carlos Esteve Rico*

ASL-0 009.C.I. Reconstrução acústica da Igreja São Miguel Arcanjo das Missões Jesuíticas Pg. 1.430
*Josiane Reschke Pires, Maria Fernanda de Oliveira Nunes, Jorge Viçoso Patrício*

ASL-0 010.C.I. Las Siete Palabras de Cristo en la Cruz (1787) de Joseph Haydn: Implicaciones acústicas en torno a una composición específicamente concebida para el Oratorio de la Santa Cueva de Cádiz Pg. 1.439
*Maria Luisa Luceño Ramos*

ASL-0 011.C.I. Subestructuración en recintos. Método simple Pg. 1.447
*F.X.Magrans*

ASL-0 012.C.I. Estudio acústico de la Basílica de Montserrat Pg. 1.458
*Josep Martí, Ivana Rossell*

ASL-0 013.C.I. Estudio acústico de claustros. Grado de influencia de los coeficientes de difusión en la simulación acústica de un claustro Pg. 1.466
*Pau Serrano Rodrigo, Ignacio Guillen Guillamón, Vicente Gómez Lozano, Ana Llopis Reyna*

ASL-0 014.C.I. Optimization of sound diffusers based on sonic crystals Pg. 1.474
*J. Redondo, J. V. Sánchez-Pérez, X. Blasco, J. M. Herrero, M. Vörlander*

ASL-0 015.C.I. Estudio acústico del Palau de la Música de Valencia Pg. 1.482
*G.Vallejo Ortega, J.I. Sánchez Rivera*

ASL-0 016.C.I. Índices acústicos globales en grandes espacios de culto Pg. 1.490
*S. Girón, T. Zamarreño, L. Álvarez-Morales, M. Galindo*

ASL-0 017.C.I. Estudio experimental del soporte de escena en teatros y auditorios Pg. 1.498

*Ana Planells, Sara Girón, Salvador Cerdá, Jaume Segura, Rosa Cibrián, Teófilo Zamarreño, Alicia Giménez*

ASL-0 018.C.I. Acustica arqueológica: Reconstrucción de la Casa de la Olivera, teatro valenciano del siglo XVII Pg. 1.507
*Jaume Segura, Arturo Barba, Ana Planells, Salvador Cerdá, Rosa Cibrián, Alicia Giménez*

ASL-0 020.C.I. Uncertainties in room simulations Pg. 1.515
*Michael Vorländer, Matin Guski*

ASL-0 022.C.I. Diseño y simulación de una sala de cine con formato se sonido DOLBY ATMOS Pg. 1.521
*J.J. Gómez Alfageme, S. García González, E. Blanco Martín, J.L. Sánchez Bote*

ASL-0 023.C.I. 3D-modelización y simulación acústica de recintos españoles de gran capacidad Pg. 1.529
*Marta Fernández, Teófilo Zamarreño, Sara Girón, Antonio Pedrero*

ASL-0 024.C.I. Acústica virtual de la Iglesia del Palacio de San Telmo de Sevilla Pg. 1.537
*E. Alberdi, M. Galindo, A.L. León*

ASL-0 025.C.I. Virtual acoustics of the Roman theatre of Regina Turdulorum Pg. 1.545
*A. Álvarez-Corbacho, T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón, P. Bustamante*

ASL-0 026.C.I. Acústica virtual patrimonial. Aplicación a la auralización del Misteri d'Elx Pg. 1.553
*Ana Planells, Jaume Segura, Salvador Cerdá, Arturo Barba, Rosa Cibrián, Alicia Giménez*

**ULT-0 ULTRASONIDOS /**
**ULTRASSONS /**
**ULTRASOUND**

ULT-0 001.C.I. Sistema de control y caracterización de transductores ultrasónicos de potencia (UdP) basado en software Labview Pg. 1.561
*Roque R. Andrés, Alfonso Blanco, Enrique Riera, Víctor M. Acosta, Ignacio Martínez, Alberto Pinto, Ángel Guinot*

ULT-0 003.C.I. Propagación no lineal de ultrasonidos en líquidos con burbujas: Simulaciones mediante un modelo por elementos finitos Pg. 1.569
*María Teresa Tejedor Sastre, Alexandre Leblanc, Antoine Lavie, Christian Vanhille*

ULT-0 004.C.I. Characterization of the particle size distribution changes of different aerosols during an acoustic agglomeration process Pg. 1.575
*Manuel Aleixandre, Enrique Riera, Rosario Delgado, Luis E. Herranz, Victor M. Acosta, Alberto Pinto, Ignacio Martínez, Juan A. Gallego-Juárez*

ULT-0 005.C.I. Imagen ARFI multifocal Pg. 1.583
*Nuria Gonzalez-Salido, Jorge Camacho*

ULT-0 006.C.I. Development of an Ultrasonic System for Object Recognition Pg. 1.592
*Chang Gao, Nanli Wang, Lorena de la Madrid Descalzo, Marcelino Ferri, José María Bravo, Juan Vicente Sánchez-Pérez*

ULT-0 008.C.I. Detección de la corrosión en estructuras de hormigón armado mediante técnicas ultrasónicas no lineales Pg. 1.600

*Salvador Ivorra, Miguel A. Climent, Jesus Carbajo*

ULT-0 009.C.I. Uso de ultrasonidos de señal para la detección del defecto de pastosidad en jamón curado Pg. 1.609
*G. Martinez-Escriva, C. Cervera, M.E. Mora, J. Benedito, J.V. Garcia-Perez*

ULT-0 010.C.I. Mejora del tratamiento térmico moderado en jamón curado mediante ultrasonidos de potencia Pg. 1.616
*G. Martinez-Escriva, I. Portilla, A. Navarro-Cabo, J. Bon, J. Benedito, J.V. Garcia-Perez*

ULT-0 011.C.I. Reflexión de ondas acústicas por cristales de sonido Pg. 1.621
*L.J. Salmerón-Contreras, A. Cebrecos, N. Jiménez, L.M. García-Raffi, R. Picó, J. Redondo, V. Romero-García, V.J. Sánchez-Morcillo, K. Staliunas*

ULT-0 012.C.I. Changes in field distribution for physiotherapy systems when in contact with skin mimics compared to the free-field distribution Pg. 1.631
*Francisco Chinchurreta, Rob Hekkenberg*

ULT-0 013.C.I. Non-invasive temperature estimation on TMM based on the echo-shift method Pg. 1.639
*Francisco Chinchurreta, Rob Hekkenberg*

ULT-0 015.C.I. Utilización de la técnica de ultrasonidos para la detección de picudo rojo en palmeras del género Phoenix Pg. 1.647
*David Jorge, Constanza Rubio, José Mª Bravo, Marcelino Ferri*

ULT-0 016.C.I. Multilayer design of acoustic sensors for dark matter bubble chamber detectors Pg. 1.656
*I. Felis, M. Ardid, J. Ferrer, J. A. Martínez-Mora*

ULT-0 017.C.I. Transductor ultrasónico de potencia para cámaras de tratamiento con campo acústico estacionario de alta intensidad Pg. 1.664
*V.M. Acosta, J .Bon, A.Pinto, E. Riera*

ULT-0 019 Influencia de nanopartículas de silicio en HIFU Pg. 1.672
*J.C. Melgarejo, P. Candelas, C. Rubio, I. Rodriguez, E. Aparisi, A.Uris*

Índice de Autores Pg. 1.678

# AMBIENTE ACÚSTICO DE/EN LA VIVIENDA: AL ENCUENTRO DE UNA VISIÓN HOLÍSTICA

Prof. Jorge Patrício
Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC
Lisboa. Portugal
E-mail: jpatricio@lnec.pt

**ABSTRACT**

In classical antiquity, the structure of knowledge was based on introspective philosophy, medicine, mathematics and astrology, thus defining the sciences of life and of Human thinking. However, over the years, due to the development of descriptive methods of analysis and of thought itself, scientific knowledge began to be subdivided into specialized areas, creating branches of knowledge that seemed to be different between them, but that make part of the same philosophical and scientific view. And with acoustics it has not been different!

Derived from physics and embodied in technological solutions applied to propagation, reception and interpretation of sound stimuli, the acoustics was divided into several branches, such as electroacoustic, psychoacoustics, bioacoustics, environmental acoustics, building acoustics, etc. In the case of the acoustic environment inside residential houses, there is no doubt about the contribution of many branches of acoustics, for it. So, concerning a realistic assessment of noise to which residents are exposed to, it must be taken into account all related aspects, a fact that leads to the need for a more comprehensive analysis to be carried out in accordance with a holistic view of the overall system.

At this conference, an overview about the acoustic ambient inside home will be presented, emphasizing that the acoustics of the external environment and the acoustics of the building unity are not two separated realities. In fact, they both contribute to that ambient in a closely related form, namely in terms of generation, management, control, propagation and noise perception. Understanding this relationship, both in higher education institutions, as in real applications of noise control and management by policy makers and public administrations, it is clear that both branches of acoustics referred to above have a cross-influence in the same objective reality that is the protection of human against the adverse effects of noise.

In this context, it is proposed to give special focus on the need for a holistic analysis, integrated and global, of exposure to noise, in order to have a harmonious development, both at individual level and of the society as a whole.

**RESUMEN**

En la antigüedad clásica, la estructura del conocimiento se basaba en la filosofía introspectiva, en la medicina, en la matemática y en la astrología, definiendo así las ciencias de la vida y de la reflexión Humana. En el trascurso de los años, debido al desarrollo de las metodologías de análisis y del propio pensamiento, el conocimiento científico ha empezado a dividirse en áreas cada vez más especializadas, originando ramas de conocimiento, las cuales, aun pareciendo diferentes, parten de una misma visión filosófica y científica. Y con la acústica no ha sido diferente!

Derivada de la física e incorporada en soluciones tecnológicas aplicadas a la propagación, a la recepción y a la interpretación de estímulos sonoros, la acústica fue dividida en varias ramas, tales como la electroacústica, la psicoacústica, la bioacústica, la acústica ambiental, la acústica de la edificación, etc.. En el caso particular del ambiente acústico interior de los edificios residenciales, no hay duda que a él contribuyen muchas ramas. Por eso, para que la evaluación de la exposición al ruido, del cual los residentes de las viviendas están dependientes, sea realista se tienen que tener en cuenta todos los aspectos relacionados, hecho que nos conduce a la necesidad de efectuar una análisis más global, o sea de acuerdo con una visión holística del sistema.

En la conferencia se presentará una reflexión sobre el tema de la acústica en la vivienda, llamando la atención sobre el hecho de que la acústica ambiental y la acústica de la edificación no son dos realidades separadas, sino que están estrictamente relacionadas en los aspectos de generación, gestión, control, propagación y percepción de ruido. Entendida esta relación, tanto a nivel de las organizaciones de enseñanza universitaria, como de aplicaciones reales de control y gestión de ruido por parte de los responsables políticos y de las administraciones, ambas ramas de la acústica tienen un influencia cruzada en la misma realidad objetiva que es la protección del ser humano contra los efectos molestos de ruido.
Con estas premisas, se realizará un enfoque muy especial sobre la necesidad de hacer análisis integrados y globales, o sea de forma holística, para que se tenga un desarrollo armonioso del entorno humano y de la sociedad como un todo.

## 1. PREAMBULO

El ruido en la comunidad, considerando el ruido ambiente y el ruido establecido en el interior de las edificaciones, puede ser caracterizado como indeseado, non confortable, desagradable, excesivo, inesperado, etc. La exposición al ruido causa incomodidad, perturbaciones en el sueño, desequilibrios cognitivos, enfermedades cardiovasculares, tinnitus, disminuyendo, en general, la calidad de vida del ser humano. Los efectos adversos del ruido ocurren especialmente cuando determinadas necesidades, como son las de concentración, comunicación, descanso y sueño, son perturbadas, con consecuencias más nefastas en grupos vulnerables como los mayores y niños de cuna.

En relación con la salud pública, la polución sonora es uno de los mayores problemas de las sociedades actuales. Una parte muy significativa de la población europea se ve afectada por el ruido por encima de determinados niveles considerados legal y saludablemente aceptables en el contexto de las orientaciones establecidas por la World Health Organization (WHO).

Naturalmente que hay una cierta “cantidad” de ruido que tiene de ser inevitablemente producido como consecuencia de la vida urbana diaria. Pero hay límites intolerables los cuales no deberán ser traspasados para que no aporten consecuencias nefastas para la salud. Y estos niveles son para todo el espacio urbanístico, tanto en el exterior como en el interior del edificio.

En los edificios multifamiliares, el ruido generado tiene un impacto muy significativo en la privacidad y en el bienestar individual y familiar. Son muy comunes las quejas relacionadas con música en altos niveles, con voces audibles, conversación telefónica, utilización de la televisión y de otros aparatos de reproducción de sonido, golpeo de puertas, flujo de aguas residuales, y funcionamiento de sistemas de ventilación y de extracción. Esto tipo de ruidos puede ser considerado como "neighboring noise", o sea ruido de vecinos. En una evaluación de las condiciones residenciales en Europa, coordinada por la WHO, el ruido de vecinos ha sido considerado un problema de salud pública. Se puede destacar que, cumulativamente al expuesto, y proveniente del exterior, también los ruidos de tráfico, de las actividades de construcción, de la circulación de personas, etc., pueden ser audibles en el interior de las edificaciones y pueden causar mayor o menor molestia de acuerdo con la susceptibilidad de los residentes a esos estímulos.

## 2. INTRODUCIÓN

La acústica, entendida en sentido lato, se basa en conceptos de naturaleza física donde se estudian las vibraciones y las ondas mecánicas en los medios materiales y que, integrando aspectos tecnológicos, corresponde a una componente del conocimiento con "incidencia" significativa en el ser humano, sea en una perspectiva de actor principal, sea en la de receptor interesado o simplemente afectado. Se considera en el primero caso el papel que las tecnologías tienen en la difusión y propagación de la información relacionada con estímulos sonoros, y en el segundo todo lo que tenga que ver con la recepción voluntaria (placer) o involuntaria (incomodidad) de contenidos sonoros.

Las varias facetas asociadas a la acústica, permiten definirla como una área del conocimiento con elevada transversalidad, en la medida en que, al tener como objeto el ser humano, incorpora todas las sensaciones, percepciones e interpretaciones que esto les confiere, además de todos los aspectos que se encuentran relacionados con las actitudes psicofisiológicas que estos estímulos despiertan y causan en el ser humano, sea en el campo cognitivo, sea en el ámbito de la salud.

Toda esta multiplicidad compleja corresponde a un proceso evolutivo que debe ser debidamente comprendido e interiorizado. De hecho, en la antigüedad clásica, la estructura del conocimiento se basaba en la filosofía introspectiva, en la medicina, en la matemática y en la astrología, definiendo así las ciencias de la vida y de la reflexión Humana. En el trascurso de los años, debido al desarrollo de las metodologías de análisis y del propio pensamiento, el conocimiento científico ha empezado a dividirse en áreas cada vez más especializadas, originando ramas de conocimiento, las cuales, aun pareciendo diferentes, parten de una misma visión filosófica y científica. Y es en este nivel en el que se debe colocar la designada acústica urbana, la cual se basa en una vertiente de la acústica relacionada con el ambiente de nuestro entorno (la acústica ambiental) y las soluciones pasivas que permiten asegurar la calidad de vida necesaria en el sitio, último, de "refugio" humano, que es su "inner habitat" (la acústica de la edificación).

Este desafío es razonablemente ilustrado por resultados de encuesta realizada en Portugal, en tesis realizada en la Universidad de Ciencias y Tecnología (FCT), utilizando una herramienta *on-line*, sobre la importancia de los varios tipos de aislamiento en los edificios, en los cuales se incluyen las relaciones entre sus espacios interiores (viviendas) y la correspondiente integración con el ambiente exterior. Esta encuesta siguió los principios establecidos en la ISO/TS 15666 "*Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*", adoptando, en este caso, una escala numérica de once puntos. El objetivo fue "valorar" el incómodo medio asociado a las varias tipificaciones de ruido con los criterios de aislamiento reglamentarios. Un índice asociado a un ruido más molesto tendrá necesariamente un mayor coeficiente de importancia. De hecho, las respuestas a la incomodidad de la tipificación de los tipos de ruido considerados están influenciadas por las condiciones de cada

vivienda, por la localización del edificio y por las características específicas de su entorno. La Figura 1 ilustra esos resultados, donde el parámetro $\alpha_i$ representa el tipo de ruido/aislamiento considerado (p. ej. α1 representa el aislamiento de la fachada/incomodidad exterior; al que se atribuye un peso 4 dado por la noción de incómodo y un peso 7 por la noción de aislamiento, o sea el doble. El valor LNEC representa lo obtenido por el método de clasificación portugués).

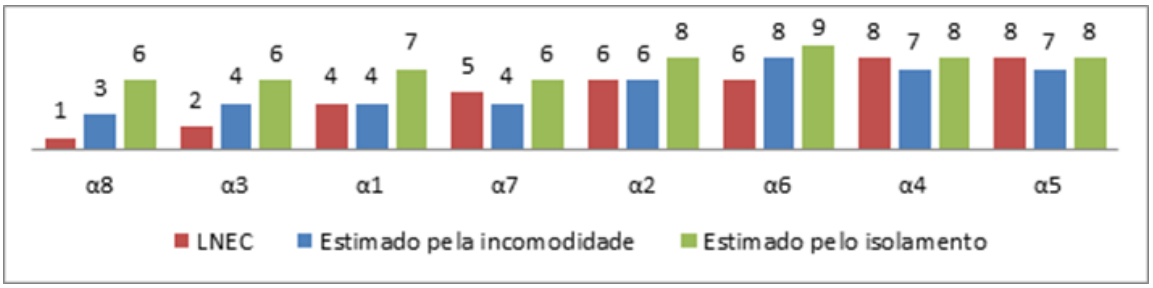



Figura 1: Magnitud de importancia de incomodidad debido al tipo de ruido/aislamiento

## 3. ACÚSTICA AMBIENTAL

La acústica ambiental es hoy asumida como una de las ramas de la acústica que estudia y evalúa la componente sonora del medio ambiente, en el sentido de gestionar, controlar y reducir, cuando fuera necesario, el ruido excesivo que pueda comprometer los criterios de sostenibilidad del ambiente. Desde un punto de vista genérico, en la mayor parte de los países de Europa, y en el caso muy particular en Portugal y España, los criterios de calidad acústica del ambiente son normalmente asociados a áreas de territorio que sean (o que prevean ser) ser, urbanizables.

Como se verifica, el ser Humano asume un papel primordial en este contexto, tanto en términos de desafíos a asumir como de objetivos a alcanzar, encontrándose posicionado como pieza determinante en las varias acciones a emprender. Tal hecho es debidamente evidenciado por la disposición del *ámbito de aplicación*, consagrada por la Directiva Europea sobre Gestión y Evaluación del Ruido Ambiente (2002/49/CE), o sea cuando el territorio no es utilizable por el hombre, entonces la noción de ruido ambiente deja de ser aspecto a considerar.

> ***Ámbito de aplicación***
>
> *La presente directiva es aplicable al ruido ambiente a que los seres humanos se encuentran expuestos, en especial en áreas construidas, parques públicos u otras zonas tranquilas de una aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, junto a las escuelas, hospitales y otros edificios en zonas de sensibilidad al ruido.*

La directiva impone a los estados miembros criterios específicos de planeamiento, gestión y control del ruido ambiente derivado de la operación de grandes infraestructuras de tráfico, así como del "funcionamiento" de las grandes aglomeraciones de poblaciones. Para ese efecto, establece la realización de mapas estratégicos de ruido y el desarrollo de planes de acción conducentes a la reducción de la población expuesta a niveles de ruido ambiente considerados lesivos para la salud. De forma análoga, contempla una vertiente de sensibilización pública con base en la cuantificación y publicación de la población que vive en edificios expuestos a

determinadas clases de ruido (se deberá tener en cuenta que el objeto directo no es la población, pero sí la vivienda donde reside, hecho que podrá dar una indicación distorsionada de la realidad de exposición al ruido).

En este contexto, se verifica que:

1) Al imponer estos criterios solo para las grandes infraestructuras y para las grandes aglomeraciones, se está minimizando el problema, porque podrán existir múltiples fuentes de ruido no incluidas en las referidas, y que pueden originar todos los efectos negativos que se intentan evitar.
2) Por otro lado, existen situaciones que no están contempladas, como son las del ruido ambiente originado por el funcionamiento de unidades comerciales y de servicios *i. e*. no cubiertas por este tipo de legislación sobre ruido ambiental.

Incluso existen países con cuadros legales complementarios al de la Directiva, en términos de ruido ambiente, como es el caso Portugués, que, para efectos de planeamiento, obliga a hacer mapas para todo el territorio urbano nacional, la versatilidad de las situaciones y la falta de actualizaciones dinámicas, no permite la existencia de una referencia sólida y efectiva para las cuestiones de exposición al ruido ambiente.

Además de lo expuesto, aunque en el contexto de la directiva, teniendo en cuenta la necesidad de regularización de situaciones de no conformidad en términos de exposición al ruido con criterios legales, o incluso con disposiciones progresistas, recorriendo a la elaboración de Planes de Acción o Planes de Reducción de Ruido, surge corrientemente la importancia de integrar los costes financieros de esas operaciones, priorizando situaciones más críticas en términos de magnitud de exposición o de cantidad de población. En este ámbito, se plantean dos posibles metodologías para tener eso en cuenta:

**Metodología A -** Se basa en los resultados obtenidos con la elaboración de Mapas Estratégicos de Ruido, y en la utilización de un Indicador de Desempeño Ambiental (EPI), aplicable a las secciones que componen cada gran infraestructura de tráfico (GIT).

La base conceptual de este indicador parte del trabajo desarrollado en el ámbito de la acción COST 354 "*Performance Indicators for Road Pavements*", en la cual fueron definidos indicadores de desempeño para diversos tipos de infraestructuras de circulación automóvil, y en el desarrollo del proyecto europeo consecuente EVITA "*Environmental Indicators for the Total Road Infrastructure Assets*", que tuvo como principal objetivo la definición de indicadores ambientales, EPI (*Environment Performance Indicators*) y la proposición de recomendaciones para su aplicación en la gestión y en el control de ruido de este tipo de infraestructuras.

Este indicador, aplicable al período reglamentario ($L_{pri}$), y para cada sección **j**, se traduce en lo siguiente:

i) **EPI** del indicador de exposición del parámetro $L_{pri}$ **($EPI_{pri}$)** - Porcentaje, convertida en una escala de 1 a 5 intervalos, del número de personas expuestas a niveles de ruido ambiente superiores a los límites establecidos por los reglamentos aplicables (en Portugal: Regulamento Geral do Ruído), expresado en términos de $L_{pri}$, en relación con el número total de personas expuestas a esos niveles de ruido, como siegue:
$TP_{pri}$ = 100 x (Nº de personas expuestas a niveles sonoros superiores al límite de exposición, $L_{den}$, del Reglamento / Nº total de personas expuestas al ruido de tráfico en la GIT, en términos de $L_{pri}$).
$EPI_{pri}$ = 0,05 x $TP_{pri.}$

**Metodología B –** Presentada recientemente en tesis desarrollada en la Universidad de Granada por Alejandro Ruiz Padillo "D*esarrollo de una metodología de toma de decisiones para el establecimiento de prioridades de actuación contra el ruido de tráfico en carreteras*", y que se basa en una análisis multi-criterio, utilizando un método de lógica difusa y un modelo lingüístico integrado en una herramienta específica; está basado en un sistema de tomada de decisiones, a saber: análisis multi-criterio, jerarquía analítica y suma ponderada. La metodología usa los métodos ELECTRE (Eliminatión et Choix Traduisant Realité) y TOPSIS (Technics for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), consultando a un panel de especialistas en ruido, decisores administrativos, y proyectistas. Estos métodos son aplicados corrientemente en análisis de marketing. A efectos de su aplicación y de las estrategias de opción de toma de decisiones sobre tramos de vía donde se vayan a introducir Planes de Reducción de Ruido, fueron estudiados los principales factores tales como la generación, propagación y atenuación del ruido de tráfico, así como las técnicas de mitigación correspondientes, efectuando también un análisis integrado entre ellos, y seleccionando a continuación los parámetros más influentes para los problemas de toma de decisión.

Debido a la gran gama de parámetros que tienen influencia en el método y al respectivo criterio (por ejemplo económico, de salud, etc.), se tuvo especial cuidado en la atribución de los correspondientes pesos de influencia en la decisión. En esto sentido, fue aplicada una metodología de jerarquía de números difusos con resultados obtenidos de las encuestas enviadas al referido panel de especialistas.
La metodología desarrollada fue testada en la zona sur de España, y puede ser extendida con alguna razonabilidad al resto del territorio español, así como a países como Portugal, en la medida en que los conceptos, cultura y órdenes de prioridad son naturalmente muy parecidos.

## 4. ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN

La acústica de los edificios comprende estudiar y proyectar una unidad edificada en la cual se aseguren condiciones de calidad acústica tales que la vida del ciudadano pueda ser lo más saludable y confortable posible, atendiendo a las restricciones que el desarrollo social y urbano intrínsecamente proporcionan.

En las exigencias esenciales a considerar en el ámbito de la calidad acústica de los edificios se consideran fundamentalmente los siguientes aspectos: integración urbanística; aislamiento a ruido aéreo; aislamiento a ruido de impacto; ruido de maquinaria y de instalaciones; y calidad acústica de espacios interiores. Sin embargo, se debe tener siempre presente que el edificio es una unidad física integrada en un contexto urbanístico, lo que torna imperativa la existencia de coherencia legal y normativa en el ámbito de los procedimientos y de las evaluaciones consecuentes, de forma que el confort acústico sea una realidad soportada por una estructura marco, no ambigua y armonizada en sus múltiples valencias. Tal hecho está patente en las introducciones legislativas de los cuadros legales portugués y español, como se expone:

**España: Artículo 14.** Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR). El objetivo del requisito básico "Protección frente el ruido" consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento. Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos.

El Documento Básico "DB HR Protección frente al ruido" especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y

la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido

**Portugal: Regulamento dos Requisitos Acústicos:** 1 — O presente Regulamento estabelece os requisitos acústicos dos edifícios, com vista a melhorar as condições de qualidade acústica desses edifícios.

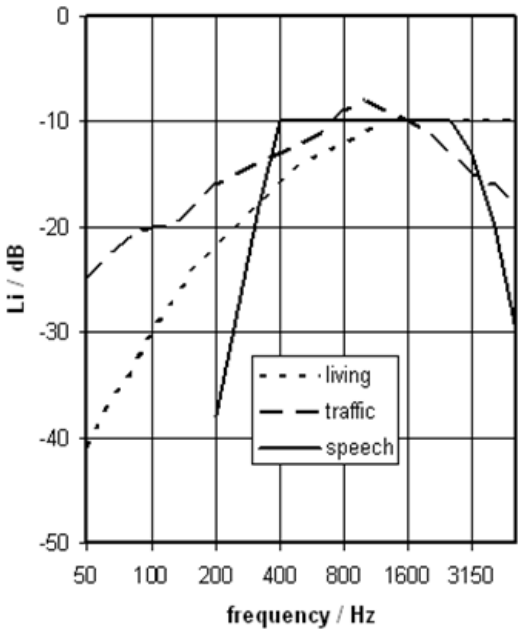
Lo mismo se pasa a nivel de la legislación Europea, en la medida en que el reglamento (UE) n.º 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de Marzo de 2011, publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea de 4 de Abril, conocido como «Reglamento de los Productos de Construcción» (RPC), determina condiciones armonizadas para la comercialización de los productos de construcción donde, en su *The Basic Requirement BR 5 – Protection against noise – establishes: The construction works must be designed and built in such a way that noise perceived by the occupants or people nearby is kept down to a level that will not threaten their health and will allow them to sleep, rest and work in satisfactory conditions.* Este requisito básico, a la vez que la seguridad estructural, el acondicionamiento térmico, la reacción al fuego y la liberación de materias peligrosas, constituye uno de los aspectos importantes para la autorización de circulación de productos en el espacio Europeo.

Análogamente a lo que ocurre en términos ambientales, también en el campo de la acústica de la edificación existe una gran preocupación e interés en integrar múltiples aspectos en la previsión del desempeño acústico del edificio, o de la solución constructiva aplicada. Esto puede ser deducido de la necesidad de extender la evaluación del desempeño acústico de los sistemas en laboratorio, también en las bandas de bajas frecuencias, “desciendo” hasta la banda de 50 Hz, tanto para los ruidos aéreos como de impacto. El mismo concepto empieza a ser aplicable al ruido de maquinaria e instalaciones, con extensión tanto en las bandas de bajas frecuencias como de altas frecuencias, y con la integración de componentes particulares de ruido como son la impulsividad o la tonalidad, o incluso valores de pico.

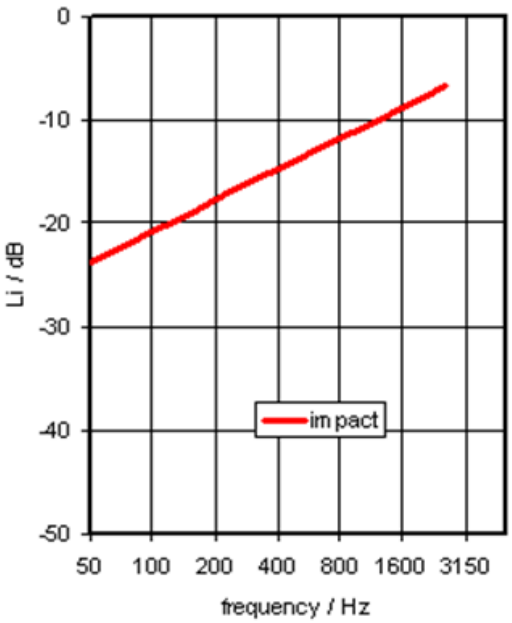
Además del proceso referido, hay otros que derivan de la revisión de las normas ISO y que inciden fundamentalmente en el tipo de espectro de excitación de los sistemas, tanto a ruidos aéreos como de impacto, los cuales originan diferentes valores de desempeño acústico para un mismo sistema constructivo, como se deducirá de los espectros tipo siguientes, cuya configuración consta en la Figura 2 (Scholl, W.; et al. – *Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717*):

a) Espectro de ruido de tráfico “traffic” (ruido aéreo), a aplicar a la caracterización del desempeño acústico de soluciones y sistemas exteriores del edificio (fachadas, ventanas);
b) Espectro de ruido de estancia “living” (ruido aéreo), a aplicar a la caracterización del desempeño acústico de soluciones de compartimentación interior (paredes y pisos);
c) Espectro de ruido de conversación ”speech” (ruido aéreo), a aplicar a la caracterización del desempeño acústico de soluciones de compartimentación interior (paredes e pisos, todavía más dirigido para las primeras);
d) Espectro de ruido de impacto, a la caracterización del desempeño acústico de pisos.

Además del hecho de que estos espectros procuren traducir más fielmente la realidad física presente en el ejercicio diario del usufructo residencial, pretenden también contemplar otros aspectos, como son la cada vez mayor utilización de soluciones de partición ligeras, las cuales son extremamente sensibles desde un punto de vista de desempeño acústico en las bajas frecuencias (muy presentes, hoy en día, en el uso de nuevos sistemas HiFi y de “home cinema”; con gran riqueza espectral en esta gama de frecuencias), y también la utilización de la residencia como zona de disfrute, lo que puede originar ruido de conversación más asiduamente.




a) Ruido aéreo




b) Ruido de impacto

Figura 2: Espectros propuestos en estudios de revisión de las normas 717 (partes 1 e 2).

No se debe dejar de referir otro aspecto importante que tiene a ver con una mayor comprensión por parte de la comunidad técnica relativamente al índice de desempeño acústico a ruido de impacto. Actualmente, y de acuerdo con los procedimientos normativos vigentes, esto es tanto mejor cuanto menor valor tuviere, al contrario que el índice de aislamiento a ruido aéreo que sigue un proceso inverso. Por ejemplo, de hecho, desde un punto de vista de propagación no es fácilmente entendible que un mismo sistema (piso) proporcione un razonable aislamiento a ruido aéreo traducido por un índice de valor elevado y que asegure un razonable aislamiento a ruido de impacto con un valor muyo bajo.

## 5. ACCIONES FUTURAS

En razón de lo que ha sido expuesto se considera fundamental desarrollar acciones en el sentido de tener una cuantificación real de la exposición al ruido, no solamente desde un punto de vista del "*número de personas en centenas viviendo en residencias expuestas a niveles de ruido por encima de…*", pero en términos globales, se deberá tener en cuenta la exposición al ruido ambiente y también la referente al designado ruido de vecinos en las viviendas, evaluando esa exposición en términos de dosis de ruido total durante un año (o una década), e integrando aspectos de impacto en las capacidades cognitivas, bien-estar, contribución para estados de *stress* y salud, para tener una percepción global del ruido.

Para este objetivo - y con la finalidad de tener una panorámica de la situación europea en términos de exposición efectiva al ruido, teniendo en cuenta las diferentes culturas y hábitos de vida que son naturalmente diferenciados en todo el territorio europeo (p. ej., Oeste en relación al Este, Sur en relación al Norte, etc.), se entiende que es importante la creación de plataforma

o Proyecto de Desarrollo Europeo, con países participantes que representen las varias regiones implicadas, Norte, Centro, Sur, Este y Oeste de Europa, en el sentido de que desarrollen acciones coordinadas, y de eso deducir estrategias integradas para alcanzar ese desafío.

Para la consecución de este objetivo sería importante tener en cuenta los varios tipos de edificios, los diferentes sistemas de construcción, la cultura y los hábitos de la población de las regiones, y su sensibilidad al ruido, así como el tipo de ruido de vecinos que pueden generar.
Y todo esto sin olvidar la educación cívica de los ciudadanos!

## 6. CONCLUSIONES

El campo de la acústica ambiental y de la edificación se encuentra en gran desarrollo, atendiendo, por un lado, las necesidades de calidad de vida de las poblaciones, y, por otro, el desarrollo tecnológico, en una perspectiva de ganancias económicas en el marco de un mercado de libre circulación de personas y productos. A eso contribuyen las Acciones COST – Redes europeas; los Comités de ISO – International Standardisation Organization y de CEN – Comité Europeo de Normalización; los Proyectos de I&D Europeos y Transnacionales; y las colaboraciones entre Universidades, Centros de Investigación y Tejido Empresarial, denominados SME “Small and Medium Enterprises”.

La publicación de Normas sobre la sostenibilidad en la construcción (EN 15643-3:2012 - Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 3: Framework for the assessment of social performance do CEN TC 350), donde se eligen las características acústicas que forman parte del indicador de descripción de impactos sociales, designado por “Salud y Confort”, han venido también a contribuir a la necesidad de una visión más global del cuadro de exposición urbana al ruido, y como último beneficiario el interior de las residencias. Además de eso, en los casos en que el ruido ambiente exterior se reduce, la percepción del ruido de vecinos pasa a ser naturalmente mayor.

Las alteraciones de corrientes de toda la ola y tendencia de armonización, simplificación y contemplación de desempeños acústicos, científicamente más ajustados a la sensibilidad (o vivencia) humana, tendrán reflejo en revisiones legales y cuadros procedimentales de los diferentes países implicados, reforzando la importancia de la calidad acústica en el interior de los edificios, como fin último a alcanzar (en el caso de Portugal, siendo notorias, no dejan de ser menos significativas que en otros países, dado que la legislación portuguesa, procedente de 2008, ya contempla algunos de los principios y conceptos expuestos, además del hecho de ser una legislación razonablemente bien estructurada).

Nuevas herramientas de previsión y evaluación, de entre las cuales se destaca la utilización de la Auralización, tendrán también un papel fundamental en la concreción de este desafío.

También, en el campo de la investigación y desarrollo tecnológico, se esperan grandes desafíos, porque apuntando al futuro, en términos de reducción de ruido ambiente, para el estudio de nuevos materiales y sistemas, tales como Meta Materials, Meta Surfaces o Sonic Cristals, para la producción de vehículos eléctricos y de sistemas de pavimentación de carreteras y de rodados más silenciosos, se está contribuyendo a una inter-relación sustentada en esto mismo dominio, con reflejos en el ambiente global, en lo cual las edificaciones están incluidas.

En lo que respecta a la edificación, la implementación de acciones de rehabilitación del parque construido y de aplicación de nuevos sistemas tecnológicos en la edificación nueva, para lo cual se exigirán ahora soluciones de partición innovadoras y que cumplan criterios de sostenibilidad vigentes, obliga a que las unidades de I&D, en colaboración con el tejido empresarial, tengan que involucrarse en un papel extremamente importante en la “procura” de

nuevos materiales, composiciones y soluciones constructivas para cumplimiento de estos requisitos.

Por consiguiente, de todo lo expuesto, se considera que una visión holística del sistema de producción, transmisión-recepción de ruido, y la forma como el ciudadano lo percibe, es fundamental para que las evaluaciones consecuentes sean sustentadas, equilibradas y creíbles.

# AMBIENTE ACÚSTICO DE/NA HABITAÇÃO: AO ENCONTRO DE UMA VISÃO HOLÍSTICA

Prof. Jorge Patrício
Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC
Lisboa. Portugal
E-mail: jpatricio@lnec.pt

**RESUMO**

Na antiguidade clássica, a estrutura do conhecimento baseava-se na filosofia introspetiva, na medicina, na matemática e na astrologia, assim definindo as ciências da vida e da reflexão Humana. No entanto, ao longo dos anos, devido ao desenvolvimento das metodologias de análise e do próprio pensamento, o conhecimento científico começou a subdividir-se em áreas cada vez mais especializadas, originando ramos do conhecimento que, parecendo diferentes, parte de uma mesma visão filosófica e científica. E com a acústica não tem sido diferente!

Derivada da física e incorporada em soluções tecnológicas aplicadas à propagação, receção e à interpretação de estímulos sonoros, a acústica foi dividida em vários ramos, tais como a eletroacústica, a psicoacústica, a bioacústica, a acústica ambiental, a acústica da edificação, etc.. No caso particular do ambiente acústico no interior de edifícios habitacionais, não há dúvida de que para ele participam muitos ramos da acústica. Por isso, para que a avaliação do ruído a que os moradores estão expostos seja realista, há que ter em conta todos os aspetos relacionados, facto que leva à necessidade de uma análise mais abrangente, ou seja, realizada de acordo com uma visão holística do sistema.

Nesta conferência, apresenta-se uma reflexão sobre a acústica na habitação, realçando-se que a acústica do ambiente exterior e a acústica do edifício não são duas realidades separadas, mas que para ela contribuem, de uma forma estritamente relacionada, aspetos de geração, gestão, controlo, propagação e perceção de ruído. Entendida esta relação, tanto em instituições de ensino universitário, como de aplicações reais de controlo e gestão do ruído pelos decisores políticos e pelas administrações públicas, ambos os ramos da acústica referidos têm uma influência cruzada na mesma realidade objetiva que é a proteção do ser humano contra os efeitos adversos do ruído.

Neste enquadramento, propõe-se dar um enfoque muito especial sobre a necessidade de uma análise holística, ou seja integrada e global, da exposição a ruído, para que se tenha um desenvolvimento harmonioso, tanto individual como da sociedade como um todo.

## 1. PREÂMBULO

O ruído na comunidade, envolvendo o ruído ambiente e o ruído estabelecido no interior das edificações, pode ser caracterizado como indesejado, desconfortável, desagradável, excessivo, inesperado, etc.. A exposição ao ruído causa incómodo, distúrbios de sono, desequilíbrios

cognitivos, doenças cardiovasculares, tinnitus, diminuindo, em geral, a qualidade de vida do ser humano. Os efeitos adversos do ruído ocorrem especialmente quando determinadas necessidades, como sejam as de concentração, comunicação, descanso e de dormir, são perturbadas, com consequências mais nefastas em grupos vulneráveis como idosos e crianças de berço.

Em termos de saúde pública, a poluição sonora é um dos maiores problemas das sociedades atuais. Uma parte significativa da população europeia é afetada pelo ruído acima de determinados níveis considerados legal e saudavelmente aceitáveis, no contexto das orientações estabelecidas pela World Health Organization (WHO).

Naturalmente que há uma certa "quantidade" de ruído que tem de ser inevitavelmente produzido como consequência da vivência urbana diária. Mas há limites intoleráveis e que não deverão ser ultrapassados, para que não haja consequências nefastas para a saúde. E estes níveis são-no em todo o espaço da vivência urbana, ocorra ela no exterior ou no interior do edificado.

Em edifícios multifamiliares, o ruído aí gerado tem um impacto muito significativo na privacidade e no bem-estar individual e familiar. São muito comuns as queixas relacionadas com música em altos níveis, com vozes audíveis, conversação telefónica, utilização de televisão e de outros equipamentos de reprodução de som, do bater de portas, do escoamento de águas residuais, e do funcionamento de sistemas de ventilação e de exaustão. Este tipo de ruídos pode ser considerado como "neighboring noise", ou seja de vizinhança. Refira-se que numa avaliação das condições habitacionais na Europa, coordenada pela WHO, o ruído de vizinhança foi considerado um problema de saúde pública. Note-se ainda que, cumulativamente ao exposto, e provindo do exterior, também o ruído de tráfego, das atividades de construção, da circulação de pessoas, etc., podem ser audíveis no interior das edificações podendo causar maior ou menor incomodidade conforme a suscetibilidade dos moradores a esses estímulos.

## 2. INTRODUÇÃO

A acústica, entendida num sentido lato, assenta em conceitos de natureza física onde se estudam as vibrações e as ondas mecânicas nos meios materiais e que, integrando aspetos tecnológicos, corresponde a uma componente do conhecimento com "incidência" significativa no ser humano, seja numa perspetiva de ator principal, seja na de recetor interessado ou simplesmente afetado. Enquadra-se no primeiro caso o papel que as tecnologias têm na difusão e propagação de informação relacionada com estímulos sonoros, e no segundo tudo o que tenha a ver com a receção voluntária (prazer) ou involuntária (incómodo) de conteúdos sonoros.

As múltiplas facetas associadas à acústica, permite defini-la como uma área do conhecimento com elevada transversalidade, na medida em que, ao ter como objeto o ser humano, enforma de todas as sensações, perceções e interpretações que este lhe confere, para além de todos os aspetos que se encontram relacionados com as atitudes psicofisiológicas que este estímulos despertam e causam no ser humano, seja no campo cognitivo, seja no âmbito da saúde.

Toda esta multiplicidade complexiva corresponde a um processo evolutivo que deve ser devidamente compreendido e interiorizado. De facto, na antiguidade clássica, a estrutura do conhecimento baseava-se na filosofia introspetiva, na medicina, na matemática e na astrologia, assim definindo as ciências da vida e da reflexão Humana. Todavia, ao longo dos anos, devido ao desenvolvimento das metodologias de análise e projeção do pensamento, este contexto único começou a subdividir-se em áreas mais especializadas, originando ramos do conhecimento que, em primeira aproximação, parecem diferentes, mas que, na verdade, fazem parte de uma mesma visão filosófica e científica. E é neste patamar que se deve colocar a

designada acústica urbana, a qual assenta numa vertente da acústica relacionada como o ambiente da nossa envolvente (a acústica ambiental) e as soluções passivas que permitem assegurar a qualidade de vida necessária no local, último, de "refúgio" humano, que é o seu "inner habitat" (a acústica da edificação).

Este desiderato é razoavelmente ilustrado por resultados de inquérito realizado em Portugal, no âmbito de tese realizada na Faculdade de Ciências e Tecnologia, com auxílio de uma ferramenta *on-line*, sobre a importância dos vários tipos de isolamento nos edifícios, nos quais se incluem as relações entre os seus espaços interiores (fogos) e a correspondente integração no ambiente exterior. Este inquérito seguiu os princípios estabelecidos na ISO/TS 15666 "*Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*", tendo sido adotada, neste caso, uma escala numérica de onze pontos. O objetivo foi o de "valorar" o incómodo médio associado às várias tipificações de ruído com os critérios de isolamento regulamentarmente especificados. Um índice associado a um ruído mais incomodativo terá necessariamente um maior coeficiente de importância. De facto, as respostas à incomodidade associada à tipificação dos tipos de ruído em causa estão influenciadas pelas condições de cada habitação, de localização do edifício e das características da sua envolvente. Na Figura 1 ilustram-se esses resultados, onde o parâmetro $\alpha_i$ representa o tipo de ruído/isolamento considerado (p. ex. α1 respeita ao isolamento da fachada/incomodidade exterior; aqui é atribuído um peso 4 dado pela noção de incomodidade e um peso 7 pela noção de isolamento, ou seja o dobro. O valor LNEC consta de método de classificação português).

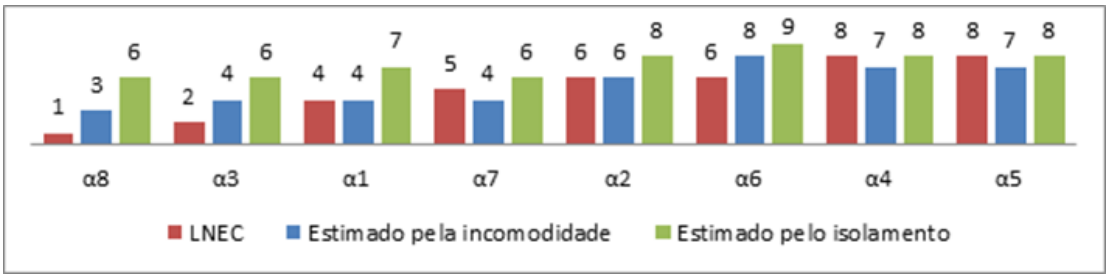



Figura 1: Magnitude de importância da incomodidade devida a tipo de ruído/isolamento

## 3. ACÚSTICA AMBIENTAL

A acústica ambiental é hoje assumida como um dos ramos da acústica que estuda e avalia a componente sonora do meio ambiente, no sentido de gerir, controlar e reduzir, quando for caso disso, o ruído excessivo que possa comprometer os critérios de sustentabilidade do ambiente. De um ponto de vista genérico, na maior parte dos países da Europa, e no caso muito particular de Portugal e Espanha, os critérios de qualidade acústica do ambiente são normalmente associados a áreas do território que sejam, ou estejam previstas ser, urbanizáveis.

Como se denota, o ser Humano assume papel primordial neste contexto, tanto em termos de desafios a prosseguir como de objetivos a atingir, encontrando-se posicionado como peça determinante nas várias ações a empreender. Tal facto, é devidamente realçado pela disposição do *âmbito de aplicação*, consagrada pela Diretiva Europeia sobre Gestão e Avaliação do Ruído Ambiente (2002/49/CE), ou seja quando o território não é utilizável pelo homem, então a noção de ruído ambiente deixa de ser aspeto a considerar.

***Âmbito de aplicação***

*A presente directiva é aplicável ao ruído ambiente a que os seres humanos se encontram expostos, em especial em áreas construídas, parques públicos ou noutras zonas tranquilas de uma aglomeração, em zonas tranquilas em campo aberto, nas imediações de escolas, hospitais e outros edifícios e zonas sensíveis ao ruído.*

Esta diretiva impõe aos estados membros critérios específicos de planeamento, gestão e controlo do ruído ambiente derivado da operação de grandes infraestruturas de tráfego, assim como do "funcionamento" das grandes aglomerações populacionais. Para esse efeito, estabelece a produção de mapas estratégicos de ruído e o desenvolvimento de planos de ação visando a redução da população exposta a níveis de ruído ambiente considerados danosos para a saúde. Analogamente, contempla uma vertente de sensibilização pública com base na quantificação e publicitação da população que vive em habitações expostas a determinadas classes de ruído (note-se que o objeto direto não é a população, mas sim a habitação onde reside, facto que poderá dar uma indicação distorcida da realidade de exposição a ruído).

Neste contexto, denota-se que:

1) Ao impor-se estes critérios apenas para as grandes infraestruturas e para as grandes aglomerações, está-se a minimizar o problema, porquanto poderão existir múltiplas fontes de ruído não enquadráveis nas referidas, e que podem originar todos os efeitos negativos que se pretendem evitar.
2) Por outro lado existem situações não contempladas como sejam as de ruído ambiente originado pelo funcionamento de unidades de comércio e serviços, *i. e*. não cobertas por este tipo de legislação sobre ruído ambiental.

Mesmo que existam países com quadros legais complementares à Diretiva, em termos de ruído ambiente, como é o caso Português, que, para efeitos de planeamento, obriga ao mapeamento de todo o território urbano nacional, a volatilidade das situações e a falta de atualizações dinâmicas, não permite a existência de um referencial sólido e efetivo para questões de exposição ao ruído ambiente.

A acrescentar ao exposto, ainda no contexto da diretiva, tendo em conta a necessidade de regularização das situações de não conformidade em termos de exposição ao ruído com critérios legais, ou mesmo com disposições de progresso, recorrendo à elaboração de Planos de Ação ou Planos de Redução de Ruído, surge correntemente a importância de integrar os custos financeiros dessas operações, priorizando situações mais críticas em termos de magnitude de exposição ou de quantidade de população. Neste âmbito, referem-se duas possíveis metodologias para ter isso em conta:

**Metodologia A -** Assenta nos resultados obtidos com a elaboração de Mapas Estratégicos de Ruído, e na utilização de um Indicador de Desempenho Ambiental (EPI), aplicável às seções que compõem cada grande infraestrutura de tráfego (GIT).

A base concetual deste indicador parte no trabalho desenvolvido no âmbito da ação COST 354 "*Performance Indicators for Road Pavements*", na qual foram definidos indicadores de desempenho para diversos tipos de infraestruturas rodoviárias, e no desenvolvimento do projecto europeu consequente EVITA "*Environmental Indicators for the Total Road Infrastructure Assets*", que teve como principal objetivo a definição de indicadores ambientais,

EPI (*Environment Performance Indicators*) e a proposição de recomendações para a sua aplicação na gestão e no controlo de ruído de infraestruturas rodoviárias.

Este indicador, aplicável ao período regulamentares ($L_{pri}$), e para cada seção **j**, traduz-se no seguinte:

i) **EPI** do indicador de exposição do parâmetro $L_{pri}$ **($EPI_{pri}$)** - Percentagem, convertida numa escala de 1 a 5 intervalos, do número de pessoas expostas a níveis de ruido ambiente superiores aos limites impostos no Regulamento Geral do Ruído, expressos em termos de $L_{pri}$, em relação ao número total de pessoas expostas a esses níveis de ruído, como se segue:
$TP_{pri}$ = 100 x (Nº de pessoas expostas a níveis sonoros superiores ao limite de exposição, $L_{den}$, do RGR / Nº total de pessoas expostas ao ruído rodoviário na GIT, em termos de $L_{pri}$).
$EPI_{pri}$ = 0,05 x $TP_{pri.}$

**Metodologia B –** Apresentada recentemente em tese desenvolvida na Universidade de Granada por Alejandro Ruiz Padillo "D*esarrollo de una metodología de toma de decisiones para el establecimiento de prioridades de actuación contra el ruido de tráfico en carreteras*", e que assenta numa análise multicritério, utilizando um método de lógica difusa e um modelo linguístico integrado numa ferramenta específica, a qual se baseia um sistema de tomada de decisões, a saber: análise multicritério, hierarquia analítica e soma ponderada. Esta metodologia usa os métodos ELECTRE (Eliminatión et Choix Traduisant Realité) e TOPSIS (Technics for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), recorrendo a um painel de especialistas em ruído, decisores administrativos, e projetistas. Estes métodos são correntemente aplicados em análises de marketing. Para efeitos da sua aplicação e das estratégias de opção de tomada de decisões sobre troços de via onde se irão introduzir Planos de Redução de ruído, foram estudados os principais fatores envolvendo a geração, propagação e atenuação do ruído de tráfego, assim como as técnicas de mitigação correspondentes, efetuando-se uma análise interligada entre eles, e selecionando-se de seguida os parâmetros mais influentes para os problemas de tomada de decisão.

Devido à larga gama de parâmetros influenciadores e ao respetivo critério (por exemplo económico, de saúde, etc.), foi tido especial cuidado na atribuição dos correspondentes pesos de influência na decisão. Nesse sentido, foi aplicada uma metodologia de hierarquia de números difusos a resultados obtidos com os questionários enviados ao referido painel de especialistas.
A metodologia obtida foi testada na zona sul de Espanha, podendo ser estendida com alguma razoabilidade ao resto do território espanhol, assim como a países como Portugal, na medida em que os conceitos, cultura e ordens de prioridade são naturalmente muito semelhantes.

## 4. ACÚSTICA DA EDIFICAÇÃO

A acústica dos edifícios visa estudar e projetar uma unidade edificada na qual estejam asseguradas condições de qualidade acústica tais, em que a vivência do cidadão possa ser o mais saudável e confortável possível, atentos os condicionalismos que o desenvolvimento social e urbano intrinsecamente proporcionam.

As exigências essenciais a considerar no âmbito da qualidade acústica dos edifícios prendem-se fundamentalmente com os seguintes aspetos: integração urbanística; isolamento a sons aéreos; isolamento a sons de percussão; ruído de equipamentos e de instalações; e qualidade acústica de espaços fechados. No entanto, deve ter-se sempre presente que o edifício é uma unidade física integrada num contexto urbanístico, o que torna imperativa a existência de coerência legal e normativa no âmbito dos procedimentos e das avaliações consequentes, de forma que o conforto acústico seja uma realidade suportada por uma estrutura enquadradora

não-ambígua e harmonizada nas suas múltiplas valências. Tal é patente nas introduções legislativas aos quadros legais Português e Espanhol, como se expõe:

**Espanha: Artículo 14.** Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR). El objetivo del requisito básico "Protección frente el ruido" consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento. Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos.

El Documento Básico "DB HR Protección frente al ruido" especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido

**Portugal: Regulamento dos Requisitos Acústicos:** 1 — O presente Regulamento estabelece os requisitos acústicos dos edifícios, com vista a melhorar as condições de qualidade acústica desses edifícios.

O mesmo se passa a nível da legislação Europeia, na medida em que o regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Março de 2011, publicado no Jornal Oficial da União Europeia de 4 de Abril, mais conhecido como «Regulamento Produtos de Construção» (RPC), determina condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção, onde, no seu *The Basic Requirement BR 5 – Protection against noise – establishes: The construction works must be designed and built in such a way that noise perceived by the occupants or people nearby is kept down to a level that will not threaten their health and will allow them to sleep, rest and work in satisfactory conditions.* Este requisito básico, a par com a segurança estrutural, o desempenho térmico, a reação ao fogo e a libertação de matérias perigosas, constitui um dos aspetos importantes na autorização de circulação de produtos no espaço Europeu.

Analogamente ao que ocorre em termos ambientais, também no campo da acústica da edificação existe uma grande preocupação e interesse em integrar múltiplos aspetos na prospetivação do desempenho acústico do edifício, ou da solução construtiva aplicada. Tal pode ser inferido da necessidade de estender a avaliação do desempenho acústico dos sistemas em laboratório, também nas bandas de baixas frequências, "descendo" até à banda de 50 Hz, tanto para os sons aéreos como de impacto. O mesmo conceito começa a ser aplicável ao ruído de equipamentos, com extensão tanto nas bandas de baixas frequências como de altas frequências, e com a integração de componentes particulares de ruído como seja a impulsividade ou a tonalidade, ou mesmo valores de pico.

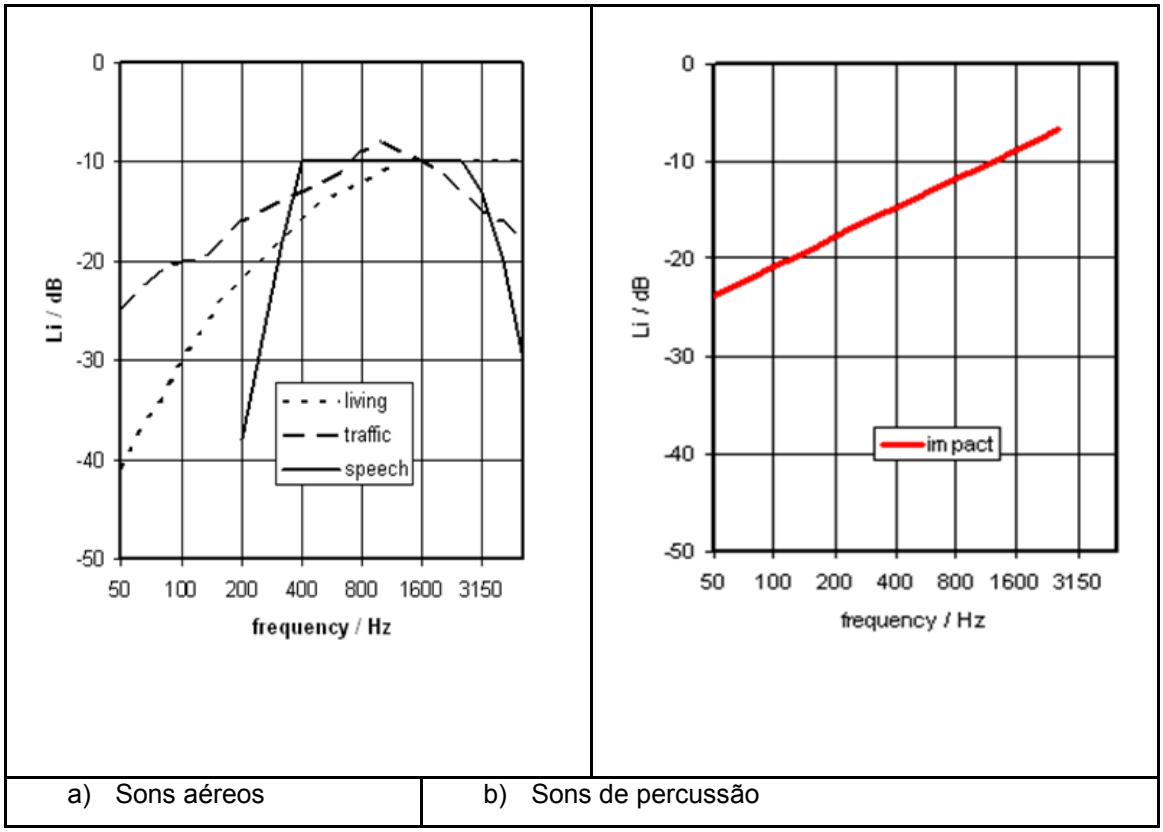
Para além do processo referido, há outros que decorrem da revisão das normas ISO e que incidem fundamentalmente no tipo de espectro de excitação dos sistemas, tanto a sons aéreos como de percussão, os quais irão originar diferentes valores de desempenho para um mesmo sistema construtivo, como se deduzirá dos espectros tipo seguintes, cuja configuração consta da Figura 2 (Scholl, W.; et al. – *Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717*):

a) Espectro de ruído de tráfego "traffic" (sons aéreos), a aplicar à caracterização do desempenho das soluções e sistemas da envolvente do edifício (fachadas, janelas);
b) Espectro de ruído de vivência "living" (sons aéreos), a aplicar à caracterização do desempenho das soluções de compartimentação interior (paredes e pavimentos);

c) Espectro de ruído de fala ”speech” (sons aéreos), a aplicar à caracterização do desempenho das soluções de compartimentação interior (paredes e pavimentos, todavia mais orientado para as primeiras);

d) Espectro de ruído de impacto (sons de percussão), a aplicar à caracterização do desempenho de pavimentos.

Para além do facto destes espectros procurarem traduzir mais fielmente a realidade física presente no exercício diário do usufruto habitacional, pretendem também contemplar outros aspetos, como sejam a cada vez maior utilização de soluções de compartimentação leves, as quais são extremamente sensíveis de um ponto de vista de desempenho nas baixas frequências (muito presentes, hoje em dia, no uso dos novos sistemas HiFi e de “home cinema”; com grande riqueza espectral nesta gama de frequências), e também a utilização da residência como zona de lazer, o que pode originar ruído de conversação mais amiudamente.




a) Sons aéreos b) Sons de percussão

Figura 2: Espectros propostos em estudos de revisão das normas 717 (partes 1 e 2).

Não é de deixar de referir outro pressuposto importante e que tem a ver com uma maior compreensão por parte da comunidade técnica relativamente ao índice de desempenho a sons de percussão. Atualmente, e de acordo com os procedimentos normativos vigentes, este é tanto melhor quanto menor valor tiver, ao passo que o índice de isolamento a sons aéreos segue o processo inverso. Por exemplo, de facto, de um ponto de vista de propagação não é facilmente entendível que um mesmo sistema (pavimento) assegure um bom isolamento a sons aéreos traduzido por um índice de valor elevado e que assegure um bom isolamento a sons de percussão com um valor muito baixo.

## 5. AÇÕES FUTURAS

Em face do exposto considera-se fundamental desenvolver ações no sentido de se ter uma quantificação real da exposição ao ruído, não só de um ponto de vista de "*número de pessoas em centenas vivendo em habitações expostas a níveis de ruído acima de…*", mas em termos globais, devendo-se ter em conta a exposição ao ruído ambiente e também a referente ao designado ruído de vizinhança nas habitações, avaliando essa exposição em termos de dose de ruído total durante um ano (ou uma década), e integrando aspetos de impacte nas capacidades cognitivas, bem-estar, contribuição para estados de *stress* e saúde, de forma a ter-se uma perceção global do ruído.

Para este objetivo - e a fim de se ter uma panorâmica da situação europeia em termos de exposição efetiva ao ruído, tendo em atenção as diferentes culturas e hábitos de vida, os quais são naturalmente diferenciados ao longo do território europeu (p. ex., Oeste em relação a Este, Sul em relação ao Norte, etc.), entende-se ser importante a criação de plataforma ou Projeto de Desenvolvimento Europeu, com países participantes que representem as várias regiões em causa, Norte, Centro, Sul, Este e Oeste da Europa, no sentido de desenvolverem ações coordenadas e daí inferir estratégias integradas para atingir esse desiderato.

Para a consecução deste objetivo seria importante ter em conta os vários tipos de edifícios, os diferentes sistemas de construção, a cultura e os hábitos da população das regiões, a sua sensibilidade ao ruído, assim como o tipo de ruído de vizinhança que podem gerar.
E tudo isto sem esquecer a educação cívica dos cidadãos!

## 6. CONCLUSÕES

O campo da acústica ambiental e da edificação encontra-se em franco desenvolvimento, atentas, por um lado, as necessidades de qualidade de vida das populações, e, por outro, o desenvolvimento tecnológico, numa perspetiva de ganhos económicos no quadro de um mercado de livre circulação de pessoas e produtos. Para isso contribuem as Ações COST – Redes europeias; os Comités da ISO – International Standardisation Organization e do CEN – Comité Europeu de Normalização; os Projetos de I&D Europeus e Transnacionais; e as colaborações entre Universidades, Centros de Investigação e Tecido Empresarial, nomeadamente SME "Small and Medium Enterprises".

A publicação de Normas sobre a sustentabilidade na construção (EN 15643-3:2012 - Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 3: Framework for the assessment of social performance do CEN TC 350), onde se elegem as caraterísticas acústicas como fazendo parte do indicador de descrição de impactes sociais, designado por "Saúde e Conforto", tem vindo também a contribuir para a necessidade de uma visão mais global do quadro de exposição urbana ao ruído, e como último objeto o interior das habitações. Além disso, nos casos em que o ruído ambiente exterior diminui, a perceção do ruído de vizinhança passa a ser naturalmente maior.

As alterações decorrentes de toda a onda e tendência de harmonização, simplificação e contemplação de desempenhos, cientificamente mais ajustados à sensibilidade (ou vivência) humana, terão reflexo em revisões legislativas e quadros procedimentais dos diferentes países envolvidos, reforçando a importância da qualidade acústica no interior dos edifícios, como fim último a atingir (no caso de Portugal, apesar de serem notórias, não deixam de ser menos significativas que em outros países, porquanto a legislação portuguesa, sendo datada de 2008, já contempla alguns dos princípios e conceitos expostos, para além do facto de ser uma legislação razoavelmente bem estruturada).

Novas ferramentas de previsão e avaliação, de entre as quais se destaca a utilização da Auralização, terão também um papel fundamental na concretização deste desafio.

Também, no campo da investigação e desenvolvimento tecnológico, se avizinham grandes desafios, porquanto apontando o futuro, em termos de redução de ruído ambiente, para o estudo de novos materiais e sistemas, tais como Meta Materials, Meta Surfaces ou Sonic Cristals, para a produção de veículos elétricos e de sistemas de pavimentação e de rodados mais silenciosos, está-se a contribuir para uma inter-relação sustentada nesse mesmo domínio, com reflexos no ambiente global, no qual as edificações estão inseridas.

No que respeita ao edificado, a implementação de ações de reabilitação do parque construído e de aplicação de novos sistemas tecnológicos na edificação nova, para o qual se exigirão agora soluções de compartimentação inovadoras e que cumpram critérios de sustentabilidade vigentes, obriga a que as unidades de I&D, em colaboração com o tecido empresarial, tenham que desempenhar um papel extremamente importante na “procura” de novos materiais, composições e soluções construtivas para satisfação destes requisitos.

Assim sendo, de tudo o exposto, considera-se que uma visão holística do sistema de produção, transmissão e receção de ruído, e da forma como o cidadão o perceciona, é fundamental para que as avaliações decorrentes sejam sustentadas, equilibradas e credíveis.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ADVANCEMENTS IN 3D AUDIO USING AMBISONICS

PACS: 43.38.p

Alois Sontacchi, Matthias Frank, Franz Zotter
Institute of Electronic Music and Acoustics
Inffeldgasse 10
8010 Graz, Austria
Tel: ++43/316 389 3548
E-mail: sontacchi@iem.at

## ABSTRACT

This contribution reviews the basics of Ambisonics and outlines examples of applied Ambisonics using microphone and loudspeaker arrays, and headphone-based rendering. Recent achievements will be addressed in Ambisonic software, panning and decoding, and the observation and optimizing of perceptual properties. Moreover, another highly topical field of higher-order Ambisonic recording is discussed, its fundamental spatial resolution versus SNR and bandwidth problem, a new filtering approach, and spatial mastering effects.

## 1. INTRODUCTION

It was nearly 15 years ago, when higher-order Ambisonics became a research question at our lab. This was caused by the necessity in advant-garde music theatre, where defined sound objects should be moved on fixed trajectories around the audience at various venues. Ambisonics was considered to be a good starting point, because it is a 3D recording and playback method that is based on the representation of the sound field excitation as a decomposition into spherical harmonics. This representation facilitates spatial sound production that is independent of the playback system. The adaptation to a given playback system (loudspeakers or motion-tracked headphones) is achieved by a suitable decoder.

This contribution gives an overview of the current state-of-the-art in Ambisonics including content production using Ambisonic main microphone arrays or panning of virtual sources, spatial effects, and reproduction by loudspeakers and headphones. The software for the whole production chain is already available as a VST-plugin suite for digital audio workstations.

Ambisonics [1, 2] has a fourty-year tradition now in producing 3D audio content. Its potential nowadays to become one of the main production technologies might be due to this long tradition. Its original recording technology was conceived to be of low spatial resolution, as one could only manufacture first-order gradient transducers of high audio quality. This limitation made a perceptually stable spatial playback hard to accomplish, but the ten-to-twenty years use of higher order Ambisonics [3, 4, 5, 6] could be shown to be free of tight resolution deficits.

Still, the area around the center of practical higher-order Ambisonic systems, the *physical sweet spot* in which a sound field can be recreated phyically accurately, is limited to few centimeters at high frequencies [7]. Nevertheless, the *perceptual sweet spot* covers most of the listening area when employing Ambisonics as an amplitude-panning method [8]. In this case, the advantage of higher-order Ambisonics lies in the perceptual effect of a phantom source [9] rather than a physically accurate sound field synthesis [10]: At low frequencies, the level differences between the loudspeakers create time differences between the ears [11] which are the dominant localization cues in the horizontal plane [12].

**Why the time is now to start producing in Ambisonics:**

We not only have all scientific evidence that it works [13, 14], but also we finally have the higher-order recording equipment [15] and user-friendly tools:

Free VST-plugins [16] that largely simplify producing Ambisonic content were released and awarded the gold medal of the AES Student Design Competition 2014, Berlin. Moreover, a tool to prepare arbitrary loudspeaker layouts for playback is available for free: the Ambisonic Decoder Design Toolbox [17]. Last but not least, the MPEG-H standard is on its way which will support distributing higher-order Ambisonic content.

This paper first gives an overview of Ambisonics in terms of its basics, signal flow, and perceptual aspects. The subsequent sections introduce first- and higher-order main microphone arrays for Ambisonic recordings and spatial effects in the Ambisonic domain. Finally, the paper presents current decoding strategies for Ambisonic playback on arbitrary loudspeaker arrangements and headphones.

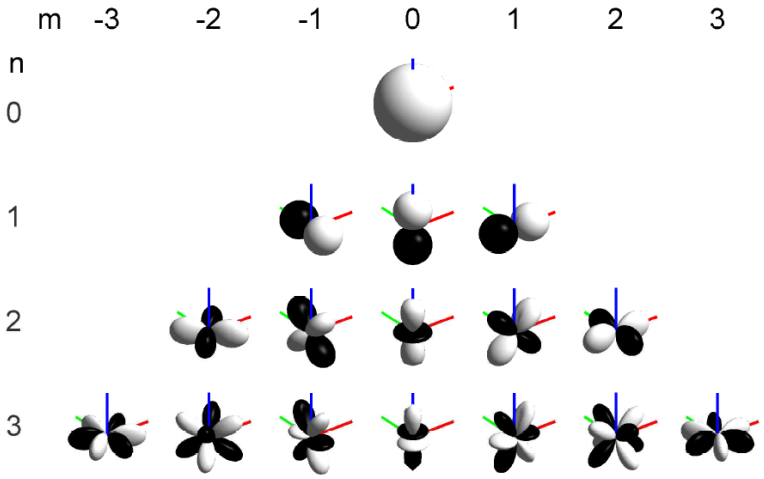



**Fig. 1:** First 16 spherical harmonics with order *n* and degree *m*.

## 2. BASICS OF AMBISONICS

Ambisonics [18, 1, 6, 3] is based on the representations of the sound field excitation in terms of orthogonal basis functions. In the three-dimensional case, these functions are the so-called *spherical harmonics*, cf. Figure 1. Their maximum order $N$ determines the spatial resolution, the number of channels, and the minimum number density of loudspeakers required for reproduction.

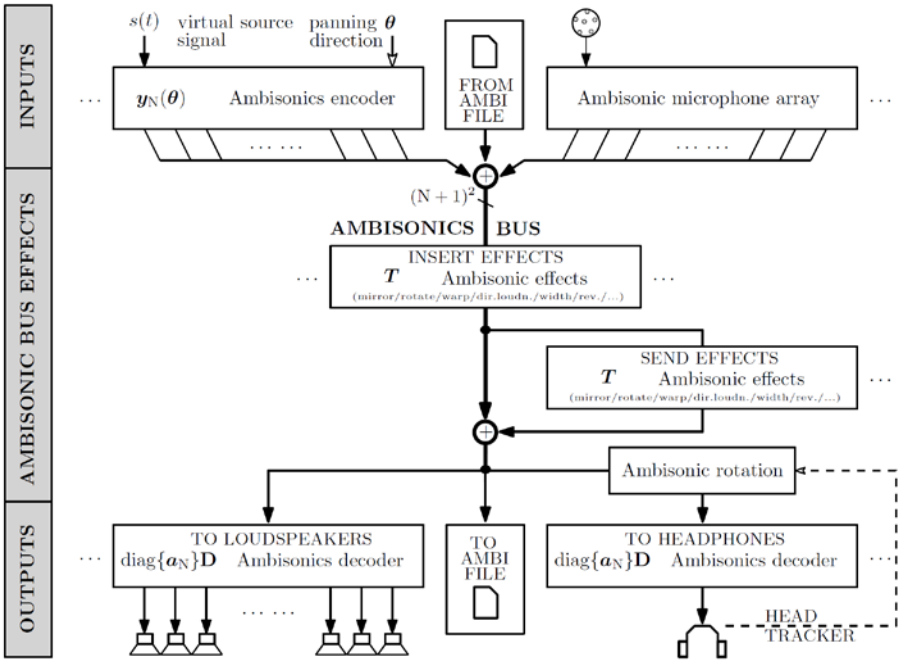



**Fig. 2:** Signal flow of Ambisonics including inputs (Ambisonic encoder, microphone arrays, files), Ambisonics bus with effects (insert or send), and outputs (loudspeaker signals, head-tracked headphone signals, files).

### 2.1. Signal Flow

The signal flow of Ambisonics is exemplarily shown in Figure 2. The spherical harmonics representation allows for the application of a bus system. The channel count $(N+1)^2$ of this bus is determined by the maximum order $N$ and does not depend on the number of sources. For a single source panned at a direction $\boldsymbol{\theta}$, $\boldsymbol{\theta}=[\cos(\varphi)\sin(\vartheta), \sin(\varphi)\sin(\vartheta), \cos(\vartheta)\,]^T$ with the azimuth $\varphi$ and zenith angles $\vartheta$, the Ambisonic spectrum $\boldsymbol{y}_N(\boldsymbol{\theta})$ is calculated frequency-independently by evaluating the spherical harmonics at $\boldsymbol{\theta}$. As alternative inputs, Ambisonic microphone arrays (see section 3) or pre-produced Ambisonic files can be employed.

All inputs are summed up in the Ambisonics bus that can be modified by either multichannel insert or send effects. More details on the spatial Ambisonics effects can be found in section 4. Note that effects are not bound to the Ambisonics bus, but they can also be applied directly to the inputs.

For playback, the final channels of the Ambisonics bus can be either decoded to loudspeakers and head-tracked headphones, or stored in a file for playback on arbitrary systems. The decoder derives the signals $s_l(t)$ for the $L$ loudspeakers of an arrangement from the Ambisonic bus by multiplication with the order-weighted, real-valued and time-invariant decoder matrix $diag\{\boldsymbol{a}_N\}\boldsymbol{D}$. The matrix $\boldsymbol{D}$ is derived from the spherical harmonic spectra $\boldsymbol{y}_N(\boldsymbol{\theta}_l)$ of each (virtual) loudspeaker $\boldsymbol{Y}_N = [\boldsymbol{y}_N(\boldsymbol{\theta}_1), \boldsymbol{y}_N(\boldsymbol{\theta}_2), \ldots, \boldsymbol{y}_N(\boldsymbol{\theta}_L)]$. More details on decoder design strategies are shown in section 5.

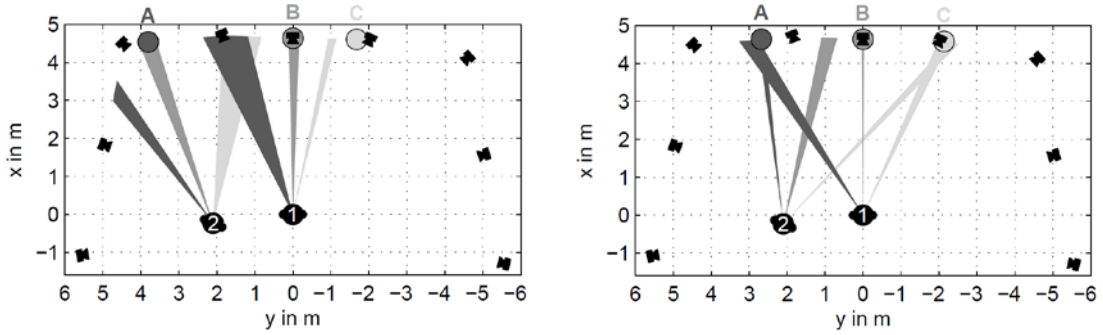



**Fig. 3:** Confidence intervals (gray beams) of the median localized directions in a listening experiment [19] for 3 panning directions A, B, C (gray filled circles), and 2 listening positions 1, 2.

### 2.2. Order and Order Weighting

In comparison to vector-base amplitude panning [20] (VBAP) that does not have such a modal representation, Ambisonics is designed to enable playback with direction-independent, smooth quality. Smoothness is gained by giving up on the accurate localization achievable with a single active loudspeaker. The match between panning direction and perceived direction increases with the Ambisonics order, cf. Figure 3 [19]. This is even more evident for off-center listening positions. Besides the increased match, the variance of the experimental results decreases. Truncation of the spherical harmonic series to $N$ yields disturbing side lobes that can be attenuated by appropriate weighting $\boldsymbol{a}_N$, cf. [6] and Figure 4. $Inphase$ weighting completely suppresses side lobes at the cost of a wide main lobe. As a trade-off, the $max - \boldsymbol{r}_E$ weighting [4] maximizes the energy towards the panning direction and achieves the best localization and least coloration at all listening positions [19, 13, 21, 8]. For higher-order Ambisonic microphone arrays, different order weighting should be applied in sub-bands, cf. Section 3.2.

## 3. AMBISONIC MAIN MICROPHONE ARRAYS

3D audio production appears to be rather complicated, especially in cases of real audio scenes with a lot of maybe moving sources at various directions including height. Typical two-channel stereo or 5.1 main microphone recording technology will not map all the information correctly, and using many spot microphones can be challenging when all spatial and timbral aspects should be represented adequately.

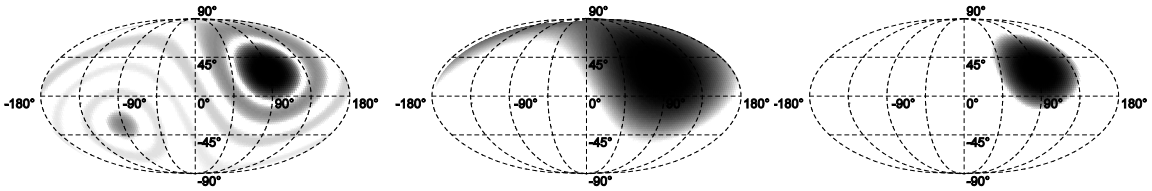
In this case, Ambisonics offers a great advantage as a 3D audio production technology: There are various main microphone arrays that can be emloyed for recording spatially rich audio scenes, spatial music, or rooms with interestingly complex reverberation.

### 3.1. First Order

The first-order Ambisonic microphone array technology has become about forty years old [22]. It consists of four coincident cardioid microphones oriented in different directions, angled by $70.5^{o}$ between any pair. The angular resolution is therefore not large, but the low number of microphones allows to employ highest quality microphones.

By now, beside the original manufacturer Soundfield/TSL Products (DSF-2, SPS422B, ST450, SPS200), also other companies such as Core Sound (TetraMic) and Oktava (4-D/MK-012) manufacture first-order Ambisonic microphone arrays.

In productions, the four channels of a first-order Ambisonic microphone deliver a well-balanced representation of ambience. However, the resolution is often not sufficient for direct sound, hence strategies such as mixing with spot microphones or the enhancement of the spatial resolution are often favorable.




(a) without weighting (b) with inphase weighting (c) with max-$r_E$ weighting

**Fig. 4:** Mollweide projection of the spherical gain distribution (25dB dynamic range) for the 5th-order source at 90° azimuth and 30° elevation for different weightings.

### 3.2. Higher Order

There is one higher-order Ambisonic microphone array commercially available at the moment, and it allows to capture stand-alone spatial recordings of high timbral and spatial definition: the Eigenmike from mhacoustics [15, 23], which achieves up to fourth-order resolution.

Research consistently indicates the achievable perceived spatial quality of such arrays [24, 25], and there have been quite impressive 3D Audio demonstrations from researchers in Paris [26, 27], Parma [28], and Graz[1,2] [16]. In these demonstrations, processing gradually reduces the spatial resolution towards low frequencies, see [29, 30, 31]. To avoid disturbing side lobe localization at all frequencies, different $max - \boldsymbol{r}_E$ weighting is required for each sub-band [32, 33].

In contrast to electronically steered beams of similarly frequency-dependent directivity, higher-order Ambisonic recording does not seem to entail the necessity of diffuse-field or free-field compensation.

### 3.3. Spatial Resolution Enhancement

To enhance the spatial definition of first-order Ambisonic recordings, two prominent approaches deliver useful results. Directional audio coding [34] (DirAC) reassigns a higher directional resolution to each frequency band of the recording by the intensity vector, whenever the intensity indicates a non-diffuse sound. Similarly, high angular resolution plane wave expansion [35] (HARPEX) assigns two plane wave directions to each frequency band. These approaches successfully enhance the information present in the recording, but they cannot exactly map more than one (DirAC) or two (HARPEX) non-diffuse simultaneous sources within one frequency band.

Despite the resolution of higher-order recordings is already much better in presenting direct sounds, further enhancement is achievable. There is a higher-order version of DirAC [36]. Moreover, an elegant super-resolution sound field imaging technique was presented by Epain [37]. It is based on subspace pre-processing that enables separation of direct from diffuse sound. Compressive sensing is applied to enhance the direct sounds.

These enhancement approaches are based on decomposition of the recording into virtual source objects. Such objects contain a sound signal and spatialization parameters such as direction and diffuseness.

## 4. SPATIAL AMBISONIC EFFECTS

When using object-based formats, the application of spatial effects is simple, because it is accomplished by changing the parameters of the object. However, a comprehensive set of spatial effects available as VST-plugins [16] can still be applied to the Ambisonics bus, which can contain several virtual source objects.

[1] http://www.matthiaskronlachner.com/wp-content/uploads/2013/01/AES_2014_Kronlachner.pdf
[2] http://www.matthiaskronlachner.com/wp-content/uploads/2013/01/kronlachner_aes_studentdesigncompetion_2014.pdf

### 4.1. Basic Effects

The Ambisonic representation as decomposition into basis functions allows for some basic spatial effects. Inverting (phase-reversing) certain channels *mirrors* the virtual sound scene along the Cartesian coordinate axes (front/back, up/down, left/right). *Rotation* requires to run the Ambisonic signals through a matrix[3].

Reordering and scaling of the Ambisonic channels can be employed in order to *convert* into different Ambisonics formats [38]. Typical non-spatial effects, such as equalization or delay, are applied to all Ambisonic channels as multichannel filters.

### 4.2. Advanced Effects

*Warping* [39,40] moves all sources of a sound scene away or towards the poles or the equator, cf. Figure 5. This is often useful for the adjustment of main microphone recordings. Similarly, *directional loudness modification* [40] can be applied to increase or decrease the level of arbitrary spatial areas. This effect allows for the level adjustment of single sound sources within the main microphone recording.

The control of salience can also be achieved by *widening* of selected sources. The Ambisonic widening algorithm presented in [41] is an efficient way of doing so by filtering without introducing much coloration. It provides a larger sweet spot compared to the 2-channel stereo version [42] using the same loudspeaker spacing, and it can also be adjusted to create early reflections.

The simplest way of creating convincing 3D *reverberation* is the convolution of the source signal with measured Ambisonic impulse responses of well-sounding locations. There is already of number of such impulse response databases available, such as the OpenAIR lib[4].

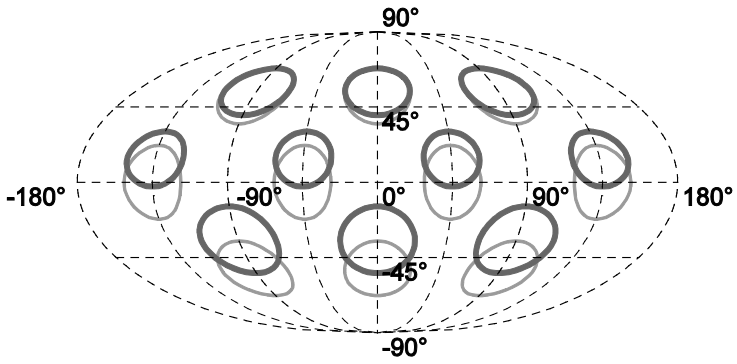



**Fig. 5**
Mollweide projection of 10 sources warped from their original location (light gray circles) towards the north pole (dark gray circles).

## 5. DECODING

Ambisonics can be played back on various systems, including both loudspeaker arrangements and headphones. This can be done by a suitable decoder matrix. In section 5.3, practical applications recently presented to a large experienced audience during the 3rd International Conference on Spatial Audience in Graz, Austria are discussed.

[3] http://ambisonics.iem.at/xchange/format/docs/spherical-harmonics-rotation
[4] freely available at http://www.openairlib.net

### 5.1 Decoding to Loudspeakers

The traditional strategies of calculating decoders for loudspeaker playback are *sampling* and *mode-matching* [43], using the transposition of $\boldsymbol{Y}_N$ or its right-inverse $\boldsymbol{Y}_N^T(\boldsymbol{Y}_N\boldsymbol{Y}_N^T)^{-1}$. However, such strategies are only suitable for regular loudspeaker arrangements covering the full sphere. For arbitrary arrangements, these strategies fail and yield large localization errors, as well as strong loudness and source width fluctuation [44, 8].
Alternative strategies were presented recently: Non-linear optimization [45, 46] can be employed to optimize perceptual relevant parameters [47, 48, 13, 21]. The *energy-preserving* strategy [49] was proposed for hemispherical loudspeaker arrangements. It reduces the set of basis functions and employs singular value decomposition.

*AllRAD* [50] is the most flexible strategy. It decodes Ambisonics to an optimal virtual *t*-design loudspeaker arrangement by sampling. This results in a decoder matrix that is mode-matching and energy-preserving at the same time. Signals of these virtual loudspeakers are mapped to the real loudspeakers using VBAP. Figure 6 shows the VBAP triangles for an AURO 13.1 arrangement. A stabilization of sources close to the border of the loudspeaker arrangement is achieved by the additional imaginary loudspeaker below the floor.

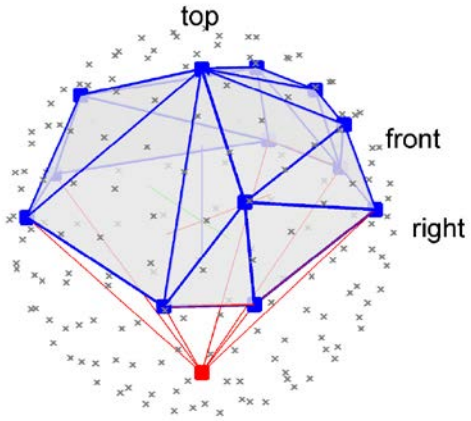



**Fig.6**
Exemplary VBAP triangulation of AllRAD for AURO 13.1 loudspeaker arrangement (blue squares), imaginary floor loudspeaker (red square), and 180 virtual *t*-design loudspeakers (gray crosses).

Useful decoder strategies are implemented in the freely available decoder design toolbox [17].

### 5.2 Decoding to Headphones

Headphone playback is practical for mobile applications, however convincing binaural playback requires careful creation of the ear signals. Basically, the spatial impression can be created by convolution of a source signal with the corresponding head-related impulse responses (HRIR) or binaural room impulse responses (BRIR). Using the loudspeaker feeds as source signals can recreate the ear signals of arbitrary loudspeaker arrays in a room.

Improved localization and plausibility is achieved by head-tracking that follows the head movements of the listener [51]. The incorporation of head movements requires sophisticated interpolation of the HRIRs/BRIRs [52].

By contrast, using Ambisonics for headphone playback [5, 53, 54] provides a simple way to involve head movements using rotation matrices, cf. Section 4.1.

### 5.3 Practical Demonstration and Fine-Tuning

During the ICSA'15 the flexibility of Ambisonics in 3D rendering was demonstrated. Comprehensive 3D audio material was played back via various local and standarized loudspeaker setups i.e. 29.2, 25.2, 22.2, 9.1, and 5.1, as well as 2.0 - in binaural format - for headphones reproduction. Therefore, conference entrants were able to directly compare the same musical content on different rendering setups. As above stated, the *AllRAD* decoding procedure was applied to convincingly demonstrate the modularity and scalability of the Ambisonics approach.

In Figure 7, the standardized 9.1 setup (left), and the local developed mobile Ambisonics Unit (25.2, right) are depicted as representatives for the used loudspeaker layouts. The AURO 3D 9.1 setup complements the standardized 5.1 setup (cf. ITU-R BS.775-1) with 4 additional loudspeakers (upper rig) positioned above the Left, Right, and Surround Left/Right speakers. In both cases, the *AllRAD* Decoder for 5th order Ambisonics, using *t*-Design with virtual Loudspeakers and VBAP to render these loudspeaker feeds on the real loudspeaker setup, was used.

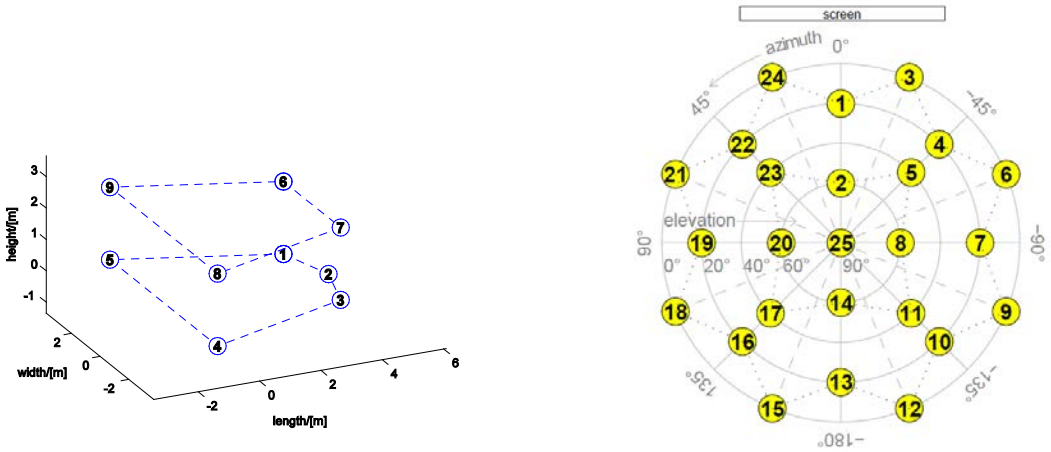



**Fig. 7:** Loudspeaker Layouts for AURO 3D 9.1 Setup (left), and mAmbA (mobile Ambisonics Unit, 25.2) (right). At the ICSA'15 the 9.1 Setup was built with 9 Lambda Labs CX-1A, and 1x Lambda Labs MF-15A loudspeakers. The mAmbA consists of 25 Genelec 8020, and 2 Genelec 7050 loudspeakers.

To support a 5.1 setup also with height-information, the loudspeaker feeds of the upper rig are filtered with peak-filters and added to the lower rig in the mix-down process. The characteristics of the peak-filters are adjusted to the (Blauert's) directional bands.

In order to support a very large audience (at the ICSA: an auditorium for 200 people), the perceptual sweet spot is optimized/extend by adjusting the compensation delays of the 29.2 loudspeaker arrangement in the Ligeti-Hall on the defined conture of a rectangular (cf. Figure 8, yellow rectangle) within the listening area instead of a singular sweet spot, at the center of the loudspeaker arrangement.

The compensation delay $\Delta_i$ of each loudspeaker $LS_i$ is derived as follows:

(1) Search the minimum distance $d_{min,i}$ between each $LS_i$ and the given contour of the yellow rectangle (cf. Figure 8).

(2) Determine the maximum of all distances $d_{min,i}$ i.e.: $md_{min} = \max(d_{min,i})$

(3) Calculate compensation delays: $\Delta_i = md_{min} - d_{min,i}$

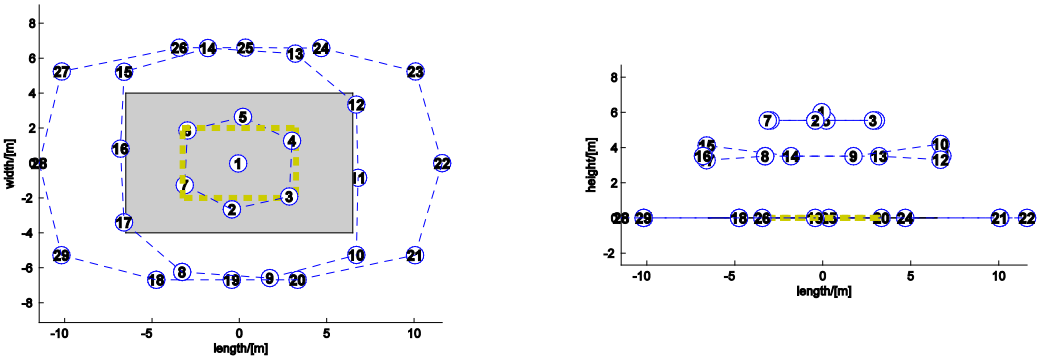



**Fig. 8:** Variable, permanent loudspeaker layout from Ligeti Hall (KUG) with loudspeaker numbers given. Left: horizontal view; Right: vertical view. The gray rectangle depicts the area of the audience. The lowest rig is adjusted lower than the mean height of the ears of the sitting audience (approx. 1m above the audience floor). The yellow lines (rectangle) indicate the optimization contour to derive the individual compensation delays for the loudspeakers.
The permanent loudspeaker setup consists of 29 Kling & Freitag (K&F) CA1001-SP and 2 K&F SW 118E-SP. In order to provide a fair comparison at the ICSA'15, this system was driven using a 5th order Ambisonics decoder using the *AllRAD* approach.

The playback of natural 3D recordings (cf. Section 3.1, and 3.2 respectively) over hemispherical loudspeaker arrangements will cause order-dependet small deviations in regard to the reproduced vertical directions of the sound sources. This drawbacks can be solved by applying order/frequency depended warping effects (cf. Section 4.2) in the decoding stage (see also [55]).

## 6. CONCLUSION AND OUTLOOK

The separation of encoding/recording and playback in Ambisonics allows for a flexible production: Playback via loudspeakers is suitable for large audiences, whereas headphone playback is practical for mobile applications. The number of storage/transmission channels determines the spatial resolution and is not depending on the number of sources. These sources can either be panned virtual sources, e.g. spot microphone signals, or recordings from Ambisonic main microphone arrays. Spatial effects can be applied in the Ambisonics domain, e.g. widening or loudness adjustment of single sources within main microphone recordings. All necessary software components are freely available as VST-plugins[5].

The implementation of a dynamic compression that does not influence the spatial image is still an open question. The omni-directional component of Ambisonics includes all signals independent of their direction and thus can be used as a side-chain to control the compression of all channels equally.

The impact of format conversation, and down-mixing strategies has to be studied in perceptual test. Furthermore, automatic sound scene optimization (focussing on timbre and sound source directions) in regard to adapted natural recordings should be treated.

## ACKNOWLEDGMENTS
This work was partly supported by the project ASD, which is funded by Austrian ministries BMVIT, BMWFJ, the Styrian Business Promotion Agency (SFG), and the departments 3 and 14 of Styria. The Austrian Research Promotion Agency (FFG) conducted the funding under the Competence Centers for Excellent Technologies (COMET, K-Project), a program of the institutions above.

[5] http://www.matthiaskronlachner.com/?p=2015

## References

[1] M. A. Gerzon, "With-height sound reproduction," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 21, pp. 2–10, 1973.
[2] P. Fellget, "Ambisonics. Part one: General system description," Studio Sound, vol. 17, pp. 20–22, 1975.
[3] D. G. Malham and A. Myatt, "3D Sound Spatialization using Ambisonic Techniques," Computer Music Journal, vol. 19, no. 4, pp. 58–70, 1995.
[4] J. Daniel, J.-B. Rault, and J.-D. Polack, "Acoustic properties and perceptive implications of stereophonic henomena," in Audio Engineering Society Conference: 16th International Conference: Spatial Sound Reproduction, 3 1999.
[5] A. Sontacchi, Dreidimensionale Schallfeldreproduktion für Lautsprecher- und Kopfhöreranwendungen. Phd thesis, TU Graz, 2003.
[6] J. Daniel, Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scenes sonores complexes dans un contexte multimédia. PhD thesis, Université Paris 6, 2001.
[7] D. Ward and T. Abhayapala, "Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers," IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 9, pp. 697–707, September 2001.
[8] M. Frank, "How to make Ambisonics sound good," in Forum Acusticum, (Krakow), 2014.
[9] K. Wendt, Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie. PhD thesis, RWTH Aachen, Germany, 1963.
[10] J. Ahrens and S. Spors, "An analytical approach to sound field reproduction using circular and spherical loudspeaker distributions," Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, no. 6, pp. 988–999, 2008.
[11] D. M. Leakey, "Some measurements on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 31, no. 7, pp. 977–986, 1959.
[12] F. L. Wightman and D. J. Kistler, "The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 91, no. 3, pp. 1648–1661, 1992.
[13] M. Frank, Phantom Sources using Multiple Loudspeakers in the Horizontal Plane. PhD thesis, University of Music and Performing Arts Graz, Austria, 2013.
[14] P. Stitt, S. Bertet, and M. van Walstijn, "Off-centre localisation performance of ambisonics and HOA for large and small loudspeaker array radii," Acta Acustica united with Acustica, vol. 100, no. 5, 2014.
[15] G. W. Elko, R. A. Kubli, and J. M. Meyer, "Audio system based on at least second order eigenbeams," Int Patent WO 03/061336 A1, 2003.
[16] M. Kronlachner, "Plug-in suite for mastering the production and playback in sorround sound ambisonics," in Gold-Awarded Contribution to AES Student Design Competition, 2014.
[17] A. K. Heller and E. M. Benjamin, "The ambisonic decoder toolbox," in Linux Audio Conference, (Karlsruhe), 2014.
[18] D. H. Cooper and T. Shiga, "Discrete-matrix multichannel stereo," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 20, no. 5, pp. 346–360, 1972.
[19] M. Frank and F. Zotter, "Localization experiments using different 2D Ambisonics decoders," in 25th Tonmeistertagung, (Leipzig), 2008.
[20] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector-base amplitude panning," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 45, no. 6, pp. 456–466, 1997.
[21] M. Frank, "Localization using different amplitude panning methods in the frontal horizontal plane," in Proc. of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics, (Berlin), pp. 42–47, 2014.
[22] P. G. Craven and M. A. Gerzon, "Coincident microphone simulation covering three dimensional space and yielding various directional outputs," British patent 1512514, 1974.
[23] G. W. Elko, R. A. Kubli, and J. M. Meyer, "Audio system based on at least second order eigenbeams," US Patent US 7587054 B2, 2009.
[24] S. Bertet, J. Daniel, E. Parizet, and O. Warusfel, "Investigation on localisation accuracy for first and higher order Ambisonics reproduced sound sources," Acta Acustica united with Acustica, vol. 99, no. 4, pp. 642–657, 2013.
[25] S. Braun and M. Frank, "Localization of 3D Ambisonic Recordings and Ambisonic Virtual Sources," in 1st International Conference on Spatial Audio, (Detmold), 2011.
[26] J. Daniel, "Evolving views on HOA: From technological to pragmatic concerns," in 1st Ambisonics Symposium, (Graz), 2009.
[27] N. Barrett, "The perception, evaluation and creative application of higher order Ambisonics in contemporary music practice," tech. rep., Ircam Composer in Research, 2012.
[28] A. Farina, A. Capra, A. Amendola, and S. Campanini, "Recording and playback techniques employed for the Urban Sounds project," in 134th Convention of the Audio Engineering Society, 2013.
[29] S. Bertet, J. Daniel, L. Gros, E. Parizet, and O. Warusfel, "Investigation of the perceived spatial resolution of higher order Ambisonics sound fields: A subjective evaluation involving virtual and real 3D microphones," in Audio Engineering Society Conference: 30th International Conference: Intelligent Audio Environments, (Saariselkä), 2007.
[30] B. Bernschütz, C. Pörschmann, S. Spors, and S. Weinzierl, "Soft-Limiting der modalen Amplitudenverstärkung bei sphärischen Mikrofonarrays im Plane Wave Decomposition Verfahren," in Fortschritte der Akustik, DAGA, (Düsseldorf), 2011.
[31] T. Rettberg and S. Spors, "Time-domain behaviour of spherical microphone arrays at high orders," in Fortschritte der Akustik, DAGA 2014, (Oldenburg), 2014.
[32] S. Lösler, „Schallfeldspezifische Entzerrung bei Radialfiltern begrenzter Dynamik für das Eigenmike." Project work, University of Music and Performing Arts Graz, 2013.
[33] S. Lösler, MIMO-Rekursivfilter für Kugelarrays. Masterthesis, University of Music and Performing Arts Graz, 2014.
[34] V. Pulkki, "Spatial sound reproduction with directional audio coding," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 55, no. 6, pp. 503–516, 2007.
[35] S. Berge, "High angular resolution planewave expansion," in 2nd Int. Symp. Ambisonics and Spherical Acoustics, (Paris), 2010.

[36] A. Politis and V. Pulkki, "Sector-based directional audio coding with higher-order microphone input," in 2nd International Conference on Spatial Audio, (Erlangen), 2014.
[37] N. Epain and C. T. Jin, "Super-resolution sound field imaging with sub-space pre-processing," in IEEE ICASSP, (Vancouver), 2013.
[38] C. Nachbar, F. Zotter, E. Deleflie, and A. Sontacchi, "ambiX-A Suggested Ambisonics Format," in 3rd Ambisonics Symposium, Lexington, KY, 2011.
[39] F. Zotter and H. Pomberger, "Warping of the recording angle in Ambisonics," in 1st International Conference on Spatial Audio, (Detmold), 2011.
[40] M. Kronlachner and F. Zotter, "Spatial transformations for the enhancement of Ambisonic recordings," in 2nd International Conference on Spatial Audio, (Erlangen), 2014.
[41] F. Zotter, M. Frank, M. Kronlachner, and J.-W. Choi, "Efficient phantom source widening and diffuseness in Ambisonics," in Joint EAA Symposium on Auralization and Ambisonics, (Berlin), 2014.
[42] F. Zotter and M. Frank, "Efficient phantom source widening," Archives of Acoustics, vol. 38, no. 1, pp. 27–37, 2013.
[43] M. A. Poletti, "A unified theory of horizontal holographic sound systems," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 48, no. 12, pp. 1155–1182, 2000.
[44] F. Zotter, M. Frank, and H. Pomberger, "Comparison of energy-preserving and all-round Ambisonic decoders," in Fortschritte der Akustik, AIA-DAGA, (Meran), 2013.
[45] D. Moore and J. Wakefield, "A design tool to produce optimized ambisonic decoders," in Audio Engineering Society Conference: 40th International Conference: Spatial Audio: Sense the Sound of Space, 2010.
[46] N. Epain, C. T. Jin, and F. Zotter, "Ambisonic decoding with constant angular spread," Acta Acustica united with Acustica, vol. 100, no. 5, pp. 928–936, 2014.
[47] M. A. Gerzon, "General metatheory of auditory localisation," in Audio Engineering Society Convention 92, (Vienna), 1992.
[48] M. Frank, "Source width of frontal phantom sources: Perception, measurement, and modeling," Archives of Acoustics, vol. 38, no. 3, pp. 311–319, 2013.
[49] F. Zotter, H. Pomberger, and M. Noisternig, "Energy-Preserving Ambisonic Decoding," Acta Acustica united with Acustica, vol. 98, no. 1, pp. 37–47, 2012.
[50] F. Zotter and M. Frank, "All-round Ambisonic panning and decoding," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 60, no. 10, pp. 807–820, 2012.
[51] H. Wierstorf, A. Raake, and S. Spors, "Binaural assessment of multichannel reproduction," in The technology of binaural listening, pp. 255–278, Springer, 2013.
[52] A. Lindau, H.-J. Maempel, and S. Weinzierl, "Minimum BRIR grid resolution for dynamic binaural synthesis," in Acoustics 08 Paris, 2008.
[53] M. Noisternig, T. Musil, A. Sontacchi, and R. Höldrich, "A 3D real time rendering engine for binaural sound reproduction," in International Conference on Auditory Display (ICAD), vol. 9, pp. 107–110, 2003.
[54] T. Musil, A. Sontacchi, M. Noisternig, and R. Höldrich, "Binaural-Ambisonic 4.Ordnung 3D-Raumsimulationsmodell mit ortsvarianten Quellen und Hörerin bzw. Hörer für PD," tech. rep., IEM Report 38/07, 2007.
[55] K. Enge, „Abbildungsverzerrungen bei der ambisonischen Wiedergabe von Eigenmikeaufnahmen – Darstellung anhand einer 3D Audio- und Videoinstallation", Bachelor Thesis, University of Music and Performing Arts Graz, 2015.

# CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO SONORO MATERIAL E INMATERIAL DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

Alicia Giménez[1], Rosa Mª Cibrián[2]
[1]Universitat Politècnica de València – [2]Universitat de València

## RESUMEN

Cuando se habla de conservar el patrimonio cultural ¿en qué es lo primero que se piensa? En la preservación de la imagen, quizá por la importancia que en general damos al sentido de la vista, pero el resto de sentidos también son importantes a la hora de captar la realidad de dicho patrimonio, y sobre todo como acústicos, es el oído y las sensaciones que nos proporciona escuchar los diferentes sonidos en los distintos entornos en que se producen. ¿Cómo suena nuestro patrimonio cultural valenciano? A esta pregunta queremos responder desde el pasado, el presente y preservarlo para el futuro. Gracias a las nuevas tecnologías y el avance en la técnica, la virtualización de todo el patrimonio y las técnicas de auralización permiten que pueda ser archivado en bases de datos, disfrutarlo y tenerlo a disposición general y por supuesto conocer como suena.

## ABSTRACT

What is our first thought when we talk about conservation of cultural heritage? We think about image preservation, perhaps because of the importance given to our sight. However, other senses are also important when perceiving heritage and, as acoustic professionals, the sense of ear highlights as it is the one that provides sensations when listening to the particular sounds of the different environments.

How does our valencian cultural heritage sound? We want to answer this question from the past, at present time and preserve it for the future. New technologies such as heritage virtualization and auralization techniques allow to store it so it can be available for anyone to enjoy and experience it sound.

## INTRODUCCION

¿Cómo suena nuestro patrimonio cultural valenciano y cómo conservarlo? Esta es la pregunta a la que queremos responder en esta conferencia. Hablamos por tanto de espacio sonoro y debe remarcarse la importancia de su caracterización, que puede permitir su catalogación y acreditarlos como pertenecientes a eventos del Patrimonio Inmaterial Cultural Sonoro de la Humanidad. Por ello, debemos encontrar la forma de realizar el levantamiento sonoro lo más exhaustivo posible.

Y esto no es sencillo, porque no solamente debemos definir y acomodar los parámetros existentes que nos permiten su evaluación cuantitativa, sino que además hemos de preguntarnos para qué nos sirven, y buscar nuevos argumentos más psicoacústicos vinculados a las emociones que perciben los auditores, que ya sabemos se encuentran vinculadas con sus estados anímicos y memorias del espacio y ambiente arquitectónico.

En el Tecniacústica'2013, Daumal se preguntaba sobre cuál podía ser el método para evaluar la belleza sonora de un ambiente, y reconocía que la belleza en el arte pictórico, escultórico y musical, se mide tanto por parámetros estéticos, como pragmáticos, e incluso éticos y emocionales.

En dicha conferencia indicaba que, cuando formulamos un juicio sobre una obra de arte teniendo en cuenta sus cualidades intrínsecas, propiamente artísticas, nos valemos de un criterio estético.

Cuando compramos una obra porque se ajusta a las medidas o los colores de la decoración de nuestro salón, estamos juzgando la obra según un criterio pragmático. Y si tiene un contenido representativo de un momento de la sociedad, una vivencia de un pueblo o expone o enaltece unos valores morales, entonces juzgamos la obra según un criterio ético y emocional.

Nosotros nos vamos a centrar en “cómo suena nuestro patrimonio”. Y vamos a ver que contiene elementos que nos permite enjuiciarlo desde criterios estéticos y emocionales.

La Comunidad Valenciana ha tenido y tiene un amplio y diverso patrimonio cultural sonoro que consideramos debe ser preservado y que hemos agrupado en 3 grupos claramente diferenciados: el que podríamos denominar patrimonio de espacios abiertos, el de los edificios patrimoniales y el de la acústica arqueológica.

## PATRIMONIO SONORO EN ESPACIOS ABIERTOS

Dentro del primer grupo empezaremos por nuestro “sonido/ruido” más representativo, “las mascletás”. Aquí, la sensación predominante es el sonido, pero cuando percibimos una mascletá en directo se siente la variación de presión en el cuerpo, se huele y se ve la explosión de la pólvora, como vemos, se integran muchos sentidos en esta percepción.

Las mascletás forman parte muy importante de la Fallas que este año se presentan para ser consideradas Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO y esperamos que lo consigan. Es difícil explicar a alguien que no las ha vivido desde niño que un sonido que llega a superar en ocasiones los 120 dB pueda resultar tan grato a nuestros oídos.

La "mascletá" es un espectáculo pirotécnico en el que el protagonista es el sonido. Al contrario que los "castillos" de fuegos artificiales, donde el espectáculo lo dan la luz y el color, y el sonido tiene un papel secundario, en la mascletá el ritmo, la progresividad y el terremoto sonoro final son los protagonistas del espectáculo. Podemos definirla como un disparo continuo de cohetes de pólvora que intercala fuego aéreo con fuegos de tierra, componiendo una melodía de menos a más con efectos atronadores impresionantes.

Su origen se remonta a finales del siglo XVIII o principios del XIX. Los hombres valencianos de la época “els mascles” se tiraban petardos a los pies calzados con alpargatas de cáñamo y apostaban a ver quién aguantaba la explosión de más petardos parándolos con los pies. El que más petardos aguantaba era “el més mascle”. Con el tiempo los petardos más potentes empezaron a denominarse popularmente “masclets” y se comenzó a atarlos y unirlos entre sí a través de mechas, para que se pudieran disparar de forma consecutiva. De esa forma fue creándose la “mascletá”.

En cada mascletá (Fig. 1), se queman un total de entre 100 y 200 Kg. de pólvora, se divide tradicionalmente en varias etapas diferenciadas y en cada una de ellas la potencia y el ritmo de las explosiones va creciendo de forma continua. El nivel sonoro aumenta hasta un nivel ensordecedor, pueden alcanzarse valores sonoros superiores a los 120 dB. Los "masclets" más potentes estallan simultáneamente, con un sonido ensordecedor que hace temblar el suelo bajo nuestros pies. Los morteros lanzan al aire simultáneamente decenas de "carcasas" (así se las denomina). El humo, el ruido, y el olor a pólvora inundan la plaza.



Figura 1: Imágenes de una mascletá: Petardos de polvora “masclets”, parte terrestre y parte aérea.

Nuestro grupo analizó varias mascletás y el histograma de niveles SPL y la distribución acumulativa temporal y permite apreciar que en este espectáculo sonoro casi durante el 90% de su duración los niveles son superiores a 90 dB.

El análisis espectral, dada su duración y el tipo de señales acústicas que la forman, es aproximadamente el mismo para todas ellas y claramente no estacionario.

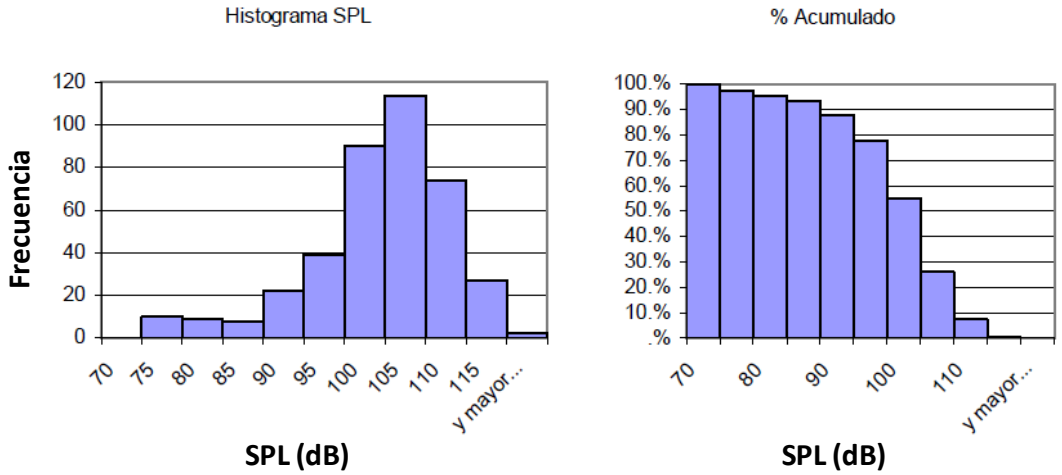



Figura 2: Niveles de presión sonora (SPL) durante una mascletá tipo.

Para analizar este fenómeno sonoro es más adecuado quizá recurrir a los diversos parámetros que la psicoacústica introduce, siguiendo a E. Zwicker. El parámetro que nos ha parecido más relevante, dado su algoritmo de cálculo, es el sharpness utilizado para cuantificar la molestia. El rango de valores de este parámetro está entre [1.1, 2], con valor medio 1.46 acum. Se observa que en la mascletá, sólo en el 2% de la duración se sobrepasan los 1.75 acum, nivel a partir del cual se puede considerar molestia (Fig. 3).

Por otro lado, aunque no hay un algoritmo claro para determinar el "ritmo", éste se puede calcular a partir de las variaciones de Loudness a lo largo de la duración de la mascletá a intervalos de 64 valores por segundo. Se obtiene un espectro de variación del Loudness con un rango de frecuencias hasta 32 Hz, y realizando este análisis sobre 5 mascletás diferentes, aparece una primera componente alrededor de los 4 Hz, valor que se toma como referencia para definir diferentes parámetros psicoacústicos (Fluctuation, Roughness). Esta componente tiene un significado especial en nuestro sistema auditivo ya que el número medio de sílabas por segundo a una velocidad de habla normal es 4.

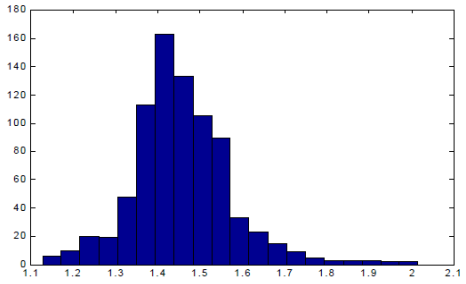



Figura 3. Distribución de valores de sharpness durante una mascletá.

Quizá algunos piensen que la mascletá es solamente un ejercicio de pirotecnia con un volumen sonoro insoportable, cuando en realidad es un verdadero concierto musical y Andrés Lara Sáenz, en su publicación "Análisis acústico de una manifestación pirotécnica: "mascletá", indicaba que: "Aquello me impresionó en varios aspectos; era ante todo un espectáculo, que conforme se iba desarrollando, provocaba una inevitable atracción y admiración, superior a toda idea de apartamiento o defensa, reacción propia ante niveles tan elevados de ruido". "Un análisis acústico de la mascletá permite distinguir un fenómeno de repetividad o periodicidad, una tendencia de aumento a lo largo del tiempo y un margen sostenido de variación de niveles instantáneos. Constituye una manifestación pirotécnica en la que pueden apreciarse características de ritmo, armonía, continuidad y crescendo".

La mascletá no es sólo volumen, el volumen no es el arte. Como indica Daumal, el arte musical es saber componer e interpretar con cualquier sonido. Por eso la mascletá es arte, y parametrizar el arte no es nada fácil especialmente si lleva implícito el sentimiento sonoro de un pueblo, el parámetro emocional, al que hacíamos referencia al hablar de una obra de arte, además del estético.

El segundo elemento importante en nuestra cultura musical son las bandas de música. Las sociedades musicales, presentes en el 90% de los municipios de más de 200 habitantes de la Comunidad Valenciana, conforman un proyecto social y educativo único en el mundo. Son el principal agente cultural de nuestra Comunidad y han sido declaradas Bien de Relevancia Local (BRL) por la Generalitat Valenciana.

En nuestra comunidad hay 544 sociedades musicales (el 50% del total en toda España) con 40.000 músicos, 60.000 alumnos de escuelas de música y más de 200.000 socios. De estas 544 sociedades musicales, el 30% (163 sociedades) tienen más de 100 años y 32 de éstas tienen acreditados más de 200 años de historia. Como hemos dicho, prácticamente cada pueblo o incluso barrios de la ciudad tienen su propia banda de música. La preservación de este bien inmaterial podríamos pensar que está asegurada por las grabaciones de alta fidelidad de sus interpretaciones en salas de conciertos, pero su mayor interés está en su integración en el paisaje sonoro de calles, glorietas y un sin número de actuaciones al aire libre, acompañando manifestaciones festivas, procesiones y la mayoría de las fiestas populares, algunas de las cuales como la fiesta de la Mare de Deu de Algemesí, está considerada Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la Unesco, o las conocidas fiestas de Moros y Cristianos que se realizan en muchos pueblos y ciudades de nuestra comunidad, acompañadas de música de tableters y dolçaines , y que también están reconocidas como BRL.

¿Cómo abordar el estudio conjunto de la banda de música o agrupación musical en un entorno abierto? Es un trabajo complejo ya que es una fuente extensa móvil en recinto abierto. Nuestro grupo no ha trabajado en el análisis de este tipo de señal, y en la bibliografía consultada hay escasas referencias relacionadas con este tema, pero sí que consideramos que es un tema relevante y hace unos meses presentamos un proyecto conjunto entre varias universidades (Navarra, Barcelona y Valencia) para abordar el estudio entre otros de la virtualización de estos entornos sonoros

La hipótesis de partida de este proyecto es que el paisaje sonoro urbano tanto en exteriores como en interiores debe ser descrito de forma más amplia de lo que establece la legislación actual y que esta descripción puede tener mayor relación con la molestia o el agrado subjetivo de lo que lo tiene con la simple descripción del nivel sonoro equivalente y que, el sonido, los ambientes acústicos, los sonidos de la naturaleza y los recuerdos sonoros, son un elemento que define la condición diferencial de una cultura, que es preciso salvaguardar, revitalizar, regenerar y difundir. El sonido de un espacio configura la identidad sonora de este lugar y forma parte del patrimonio cultural, tal como especifica la Convención por la Salvaguarda del Patrimonio Cultural Inmaterial.

Para esta descripción, es necesario investigar, desarrollar, implementar y utilizar procedimientos más eficientes y con mayor alcance, en cuanto a información se refiere, de los que actualmente describen los actuales mapas sonoros. Entre ellos las redes inalámbricas de sensores acústicos (WASN) permiten muestreos sonoros espacial y temporalmente más finos que con los actuales

y cobran especial relevancia los diferentes parámetros psicoacústicos que relacionan la molestia o agrado subjetivo generada en cada paisaje sonoro estudiado. En este sentido, de nuevo la conexión con la psicoacústica nos puede ser útil para usar algunas herramientas que son comunes, como las ya mencionadas anteriormente, el "loudness" que describe bien la potencia sonora, o los que realizan una buena descripción espectral, "sharpness", "roughness", "fluctuation strength" y el "pitch" o tonalidad global que se presenta en el entorno sonoro en estudio.

Ahora bien, este estudio de la molestia/agrado será más viable si se usan auralizaciones para la evaluación de los diferentes paisajes sonoros, ya que se trabaja en condiciones más controladas que con los registros directos de estos paisajes. Este procesado de la señal que se ha aplicado ampliamente en acústica de salas, sólo recientemente se ha utilizado en acústica ambiental y aislamiento.

En este sentido, el elemento clave en todos los estudios en acústica ambiental es un sintetizador que simula la emisión acústica de diferentes fuentes sonoras, que operan en diferentes condiciones. La emisión básica puede obtenerse a partir de registros sonoros individuales secos o anecoicos, realizar el filtrado o la convolución con la respuesta impulsiva del entorno correspondiente y combinarlos de manera granular para obtener un entorno multifuente que se aproxime a la descripción del entorno particular que queramos describir. Este sintetizador de emisión debe complementarse con un filtro temporal variable para simular efectos de propagación sonora de las posibles fuentes móviles a la posición del receptor.

El resultado de la aplicación de las auralizaciones al entorno sonoro debe compararse con grabaciones reales para evaluar la calidad de la auralización, y mediante la realización de listening-tests, de presentaciones binaurales y multicanal de los estímulos extraídos a sujetos o grupos de sujetos, se podrán parametrizar las variaciones de las auralizaciones para tener un control mayor de los parámetros que influyen en la señal fuente, para finalmente comparar la molestia/agrado de las señales medidas y sintetizadas, a partir del modelo de Zwicker u otros modelos psicoacústicos que han sido propuestos por diferentes investigadores, dependiendo del tipo de fuentes presentes en el entorno estudiado.

## PATRIMONIO SONORO EN ESPACIOS CERRADOS EXISTENTES O DESAPARECIDOS

El segundo grupo de interés para nosotros son los edificios patrimoniales, algunos de ellos específicamente dedicados a la música o el habla, Catedrales, Basílicas, Iglesias, Teatros, Salas de Conciertos, Auditorios de distintas ciudades y otros edificios civiles como la Lonja de la Seda o los Palacios, que aunque inicialmente su objetivo no era la audición, actualmente pueden ser utilizados para distintos eventos en los que la música o el habla juegan un papel importante. Son también de gran interés los edificios que actualmente están en ruinas o incluso ya no existen pero que tuvieron una importancia destacable en nuestra historia como son los teatros o corrales de comedias, como es el caso de la Olivera o monasterios que tuvieron gran importancia en su momento histórico que desaparecieron con la desamortización de Mendizábal, como es el caso del Monasterio de la Murta y que constituyen el grupo de la **acústica arqueológica.**

En nuestra investigación nos hemos centrado en la virtualización de estos edificios para permitir la auralización en ellos de cualquier tipo de señal acústica y percibirlo como en el espacio real.

Ahora bien, la metodología para tratar los edificios existentes y los desaparecidos es obviamente diferente, etiquetándose el estudio de éstos últimos como acústica arqueológica.

### *Metodología para los entornos existentes.*

En nuestro caso, hemos utilizado el esquema de la figura 4 para realizar la simulación en 3D y la correspondiente auralización de edificios de gran interés histórico como la capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y el edificio de la Lonja de los Mercaderes o de la Seda,

patrimonio de la Humanidad desde 1996, ya presentados en anteriores ediciones de Tecniacustica y en publicaciones nacionales e internacionales. El nuevo reto en el que nos hemos centrado actualmente es la simulación de la Basílica de Santa María para poder llevar a cabo la auralización del Misteri d'Elx, proclamada Obra maestra del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO desde 2001.

La simulación de este bien patrimonial implica la utilización de las herramientas, modelos y algoritmos utilizados para las salas, ya que ha sido necesario, siguiendo el esquema indicado:

Modelizar la Basílica de Santa Maria de Elx en la que se realiza la representación, y

Disponer de la señal anecoica de los pasajes cantados en la representación del Misteri para su auralización.

Respecto al punto 1, la simulación de la Basílica, ha resultado necesario modelizar el recinto en las dos situaciones de utilización: sin tramoyas (situación habitual de uso) y con las citadas tramoyas, imprescindibles para la realización de la representación artística del Misteri (Fig.5). Estas dos situaciones ha sido necesario modelizarlas tanto para una simulación visual realista como para una simulación acústica.

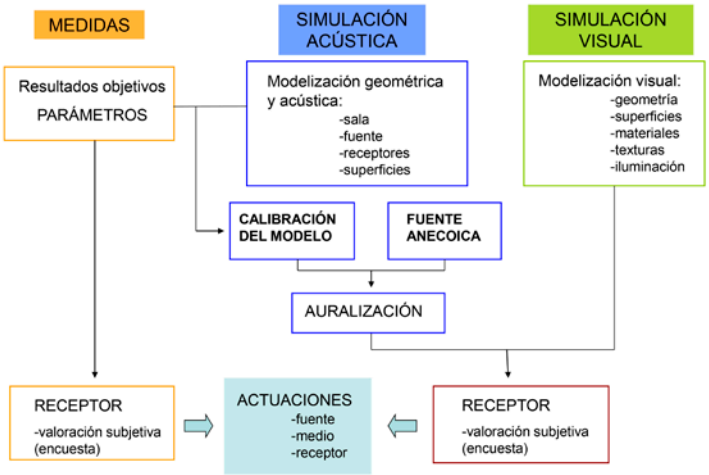



Figura 4. Esquema de las fases de un proceso de simulación virtual acústica.

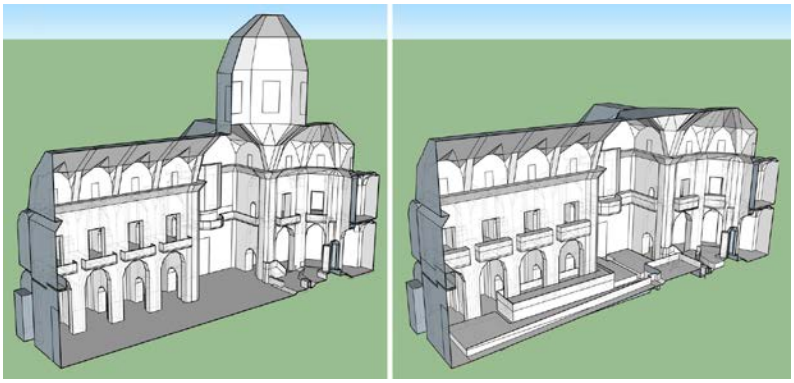


Figura 5. Modelos de la Basílica de Santa María de Elche, sin y con tramoya. En el modelo de la derecha no está modelizada la cúpula ya que en la representación del Misteri la cúpula está cerrada interiormente.

La complejidad de este edificio, al igual que el de la mayoría de los edificios patrimoniales, hace difícil su modelado geométrico. Dado que el objetivo último de estos modelos tridimensionales consiste en crear un entorno lo más realista posible tanto a nivel visual como acústico, aunque se puede partir de un mismo modelo, para sacar el máximo rendimiento a cada aspecto y debido a las incompatibilidades entre los diferentes programas, resulta ventajoso elaborar un modelo específico para cada caso, y después combinarlos ambos en un entorno de realidad virtual como el CAVE

Tras probar diferentes programas y objetos para la elaboración de los modelos, en nuestro caso hemos optado por combinar AutoCAD y 3DsMAx para el modelo visual y AutoCAD y SketchUp para los modelos acústicos. AutoCAd permite un alto nivel de precisión que resulta indispensable en el caso de espacios arquitectónicos con geometrías tan complejas como una Basílica y SketchUp permite construir caras sin límite de vértices, compatibles con los softwares de simulación acústica. Construyendo la estructura alámbrica de los elementos más complejos en AutoCAD y exportándola a SketchUp para el modelado de las caras se han conseguido buenos resultados, minimizando los errores y el tiempo invertido.

Debemos señalar que los nuevos scanners 3D digitales pueden facilitar mucho la elaboración de estos modelos geométrico-realistas y pueden ser de mucho interés para un estudio exhaustivo del Patrimonio.

Para la simulación visual es imprescindible la texturización de los modelos ya que permite dotarlos de ese acabado visual que simula el entorno real. El programa de modelado 3Ds Max es una herramienta muy potente para esta simulación y la construcción de edificios de forma virtual. El programa permite aplicar a los elementos texturas elaboradas a partir de imágenes de los propios edificios y dispone de diversos modificadores para acoplar las texturas según el elemento sea plano, circular, paralelepipédico, o incluso permite ajustar la textura punto por punto sobre el objeto deseado, cuando la geometría es más compleja. También es posible aplicar efectos de relieve y rugosidad para aproximar las texturas a su apariencia real y ofrece la utilización de combinaciones de luces de todo tipo, para imitar la luz natural del sol o la artificial, y lograr un efecto muy realista del modelo. En la figura 6 se representa imágenes del proceso de texturización de la Basilica de Santa María



Figura 6. Evolución del proceso de texturización de la Basílica de Santa maría de Elche, desde el modelo geométrico y la sucesiva incorporación de elementos.

Para la simulación acústica a cada uno de los polígonos que forman el modelo, se les deberá añadir sus características acústicas propias. Para ello, debido a las singularidades de los materiales que componen estos espacios patrimoniales y los cambios que pueden haber experimentado por el paso del tiempo, dada su antigüedad, ha resultado imprescindible la obtención de los valores reales de la absorción de los materiales que integran el entorno, lo que hemos realizado mediante la medida de la absorción “in situ”.

El proceso final es la calibración de los dos modelos acústicos con y sin tramoyas, para lo que ha sido necesario, registrar previamente la medida de los parámetros acústicos en ambas situaciones.

Respecto al segundo punto, la auralización del Misteri, sabemos que para poder obtener la señal auralizada en un entorno, además de la determinación de las características acústico-energéticas en cada ubicación (mediante la medida de la IR en cada punto considerado), se necesitan grabaciones anecoicas para poder realizar la convolución con la correspondiente IR. El problema que nos encontramos es que el registro de la señal en condiciones anecoicas dentro de una cámara, en nuestro caso resulta prácticamente imposible de realizar y además no cumple con los objetivos que se persiguen, ya que, se busca obtener una señal que se aproxime a las características reales de la interpretación.

En esta obra hay piezas a una voz (casi todas ellas se basan en la monodia gregoriana), a dos voces, tríos y piezas corales a cuatro voces. Dado que para los cantores/ejecutantes músicos necesitan escucharse tanto a si mismos si son solistas, como al resto del grupo si actúan como coro o agrupaciones musicales, no es posible hacerles actuar de forma independiente en la cámara, ni a la agrupación completa, que en algunos pasajes supera los 50 ejecutantes.

Por tanto, para obtener las grabaciones “anecoicas” necesarias para realizar la convolución con las IR, hemos apostado por una metodología de grabación de la señal en la sala de ensayo de los cantores y escolanía del Misteri (no anecoica), reduciendo al máximo el ruido de fondo y la reverberación mediante cortinas acústicas, para una vez grabada la señal eliminar la contribución de la sala y poder obtener una señal equivalente a campo libre.

Las características de esta grabación, se presentaron en el Tecniacústica’2014. Se utilizó un sistema multicanal de grabación formado por 8 micrófonos (cuatro omnidireccionales y cuatro direccionales) que rodean la fuente sonora y registran la señal simultáneamente. Este tipo de disposición de micrófonos permite obtener grabaciones para diversos formatos estándares de reproducción de audio: estéreo, cuadrafónico, 5.1 y 7.1. Al mismo tiempo se realizó la grabación binaural mediante un torso de Head Acoustics y unos auriculares-micrófono. Este dispositivo nos permite comparar los distintos formatos y las grabaciones binaurales mediante la determinación de diferentes parámetros objetivos.

La grabación de los cantores se realizó registrando sus localizaciones y con los micrófonos en la misma situación (Fig. 7). Con la sala vacía y fuente omnidireccional mediante una señal sweep se obtuvo la IR de la sala para cada punto de interés. Para el caso del coro, que estuvo formado en diversos momentos por un número variable de personas, se determinaron las respuestas impulsivas colocando la fuente en una cuadrícula densa rectangular de posiciones. De esta manera se conoce el efecto de la sala sobre las grabaciones realizadas.

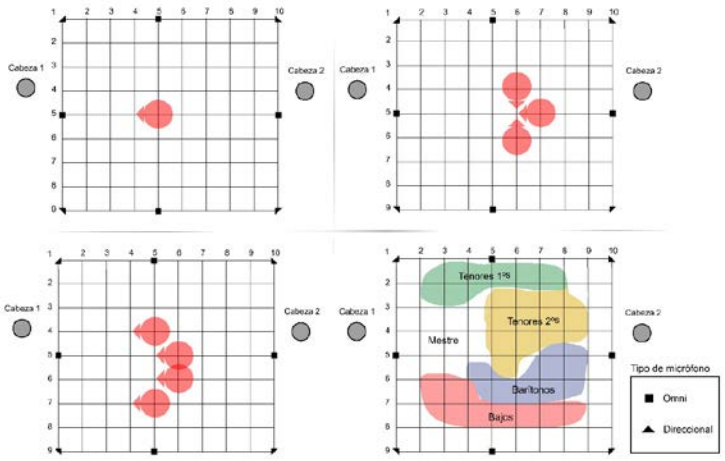



Figura 7: Ubicación y orientación de los cantantes y micrófonos y cabeza dentro de la retícula marcada en la sala de ensayo para las grabaciones.

Indudablemente el tener la grabación multicanal de la forma que se ha realizado presenta numerosas ventajas. En este momento se ha conseguido la señal anecoica para una sola voz interpretando la canción monódica “germanes mies” (hermanos míos) que ya ha sido presentada en este congreso.

El Misteri d’Elx se representa todos los años durante los días 15 y 16 de agosto en la Basílica de Santa María d’Elx. Es un drama litúrgico musical en dos partes (“La Vespra” (la víspera) y “La Festa” (la fiesta)). Narra la muerte y asunción al cielo de la Virgen María. Tiene un carácter popular, ya que los cantores son de todas las edades y en su mayoría gente aficionada a la música y al canto coral, que participa en la fiesta de manera desinteresada y la afluencia año tras año a la basílica es masiva, por lo que la absorción correspondiente al público es un parámetro realmente importante que será motivo de estudio para poder recrear totalmente la acústica de la basílica durante la interpretación de esta obra.

El tercer y último grupo de interés en esta exposición, dentro del estudio del comportamiento acústico de los edificios patrimoniales, es su “acústica arqueológica”, es decir poder saber cómo eran y cómo sonaban estos edificios en el momento de su inauguración y a lo largo de las distintas modificaciones en su historia particular.

En este sentido ya hemos analizado la evolución del Teatro Principal de Valencia, uno de los más antiguos de España, dentro del estilo italiano, desde 1832 (inauguración), hasta la actualidad (Fig.8), y las variaciones que ha experimentado la Basílica de Santa Maria de Elche, de la que acabamos de hablar, con la intención de poder virtualizar el drama litúrgico del Misteri en las distintas etapas de su evolución.

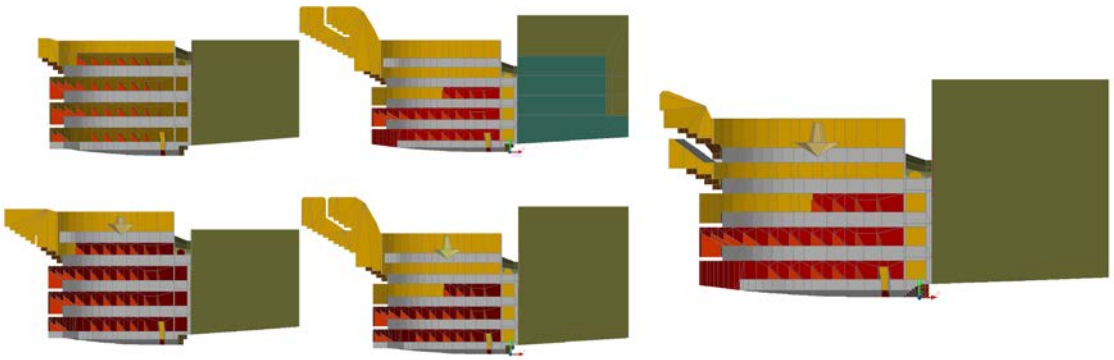


Figura. 8. Evolución del Teatro Principal de Valencia desde su inauguración en 1832 pasando por las modificaciones de 1859, 1928, 1968 y la de 2012 que corresponde a su estado actual.

Independientemente del indudable interés de este tema dentro de la acústica arqueológica, en esta conferencia queremos centrarnos en la reconstrucción acústica de edificios no existentes o en ruinas. En este caso la reconstrucción debe realizarse a partir del análisis de los restos, si los hay y de la documentación archivística, por lo que, sobre el esquema anterior relativo a la metodología para la simulación virtual acústica de los edificios existentes (Fig. 4), es necesario realizar ciertas modificaciones en atención a la inexistencia del entorno a estudiar. Así:

No se pueden determinar parámetros acústicos ni objetivos ni subjetivos

No se puede conocer la absorción real de los materiales empleados en su construcción

No es posible obtener fotografías reales para el proceso de texturización.

La imposibilidad de realizar medidas de los parámetros acústicos en el edificio a estudiar implica que no puede realizarse una calibración del modelo acústico, si bien, puede compararse los parámetros obtenidos en el modelo generado con algún entorno de similar fecha de construcción y volumen.

La medida de la absorción, no puede hacerse “in situ”, ni conocerse exactamente las características de los materiales utilizados. En este caso se recurre a la descripción del maestro de obras que en ocasiones puede encontrarse en los archivos históricos o también puede servir de referencia edificios existentes de la misma época, considerando que sean similares los materiales de construcción.

Para la texturización hay que estudiar los restos que queden, gráficos de la época o de nuevo la referencia histórica de imágenes de época de otros edificios y a partir de ello simular el no existente.

Vemos pues que en este tipo de estudio, el análisis acústico se solapa con el estudio de los archivos, tarea en ocasiones más compleja y dificultosa.

A título de ejemplo vamos a presentar la reconstrucción de dos edificios, uno totalmente inexistente en la actualidad, la Olivera, construida en la ubicación de la primera Casa de Comedias de Valencia y otro en ruinas como es el Monasterio Jerónimo de la Murta (Fig. 9).



Figura 9. Fotografías del estado actual de la iglesia del monasterio: Parte anterior de la iglesia con vista de arco y Torre de las Palomas. Parte de una capilla lateral, altar, losetas del suelo. Detalle de los arcos. Vista de la parte posterior de la iglesia.

En el caso de la Olivera, que se ha presentado en este congreso, se construyó en 1618, sustituyendo a la primera casa de Comedias que tuvo la ciudad de Valencia durante 34 años. De la primera casa de representaciones teatrales se tiene escasa información y se conoce poco más que su existencia y ubicación en la actual calle Comedias. La ampliación que se realizó de este edificio sí que está perfectamente documentado (“Llibre de la Administració de la Obra de la Casa de la Comedia”. Archivo General y Fotográfico de la Diputación de Valencia), donde puede encontrarse una descripción detallada de los materiales que componían este edificio. Este corral se entronca con la actividad teatral de nuestro siglo de oro, lo que ha motivado que el Microcluster de Patrimonio y Teatro Clásico de las dos universidades públicas valencianas, del que nuestro grupo forma parte, se haya interesado por su reconstrucción virtual.

El edificio (Fig.10) tenía una geometría en planta sensiblemente circular con una anchura de unos 15 metros y una profundidad de 13 metros. Disponía de planta baja y dos alturas y se encontraba cubierto. Tenía capacidad para unos 1800 espectadores. La documentación existente incluye estudios detallados sobre el aforo y un plano esquemático de su distribución en planta del año 1678. (Fig.10 Izda). La planta baja contaba con sillas en las que se ubicaban la nobleza, clases para-nobiliarias y clero; bancos detrás de éstas y unas gradas al fondo. La primera planta estaba dividida en 20 aposentos que constituían las localidades más caras y lujosas del teatro. Por último, la segunda planta conocida como “cazuela” estaba reservada exclusivamente a las mujeres. Cada una de las zonas contaba con un acceso propio independiente.

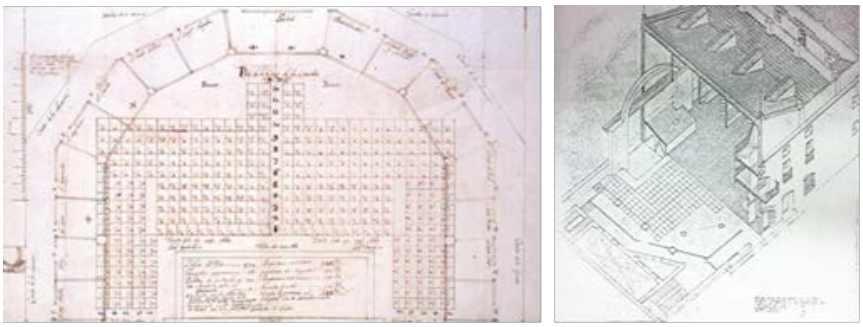


Fig 10. (Izqda) Planta esquemática de la Casa de Comedias de Valencia en el año 1678, anónimo, Valencia, 1678 (Archivo General y Fotográfico de la Diputación de Valencia). (Dcha) Reconstrucción del Teatro de la Olivera en base a la capitulación de 1618 y el plano de 1678. Axonometría. (Ros J.L.: L'efímer en la formació del barroc valencià, 1599-1632. Tesis doctoral, 1981.)

El escenario estaba formado por un único tablado rectangular que el público rodeaba por tres de sus lados, detrás se encontraba el vestuario de los actores y sobre éste un balcón corrido, al que se accedía por dos escaleras laterales en el exterior del vestuario, llamado "balcón de las apariciones" y utilizado para la representación de personajes abstractos o figuras morales. Esta Casa de Comedias permaneció en uso hasta 1715 cuando, debido a su mal estado, se decidió demolerla y construir una nueva que se mantuvo hasta 1750.

Utilizando la metodología comentada anteriormente se ha elaborado un modelo simplificado de la Nueva Olivera (Fig.11), utilizando los software AutoCAD y SketchUp. Se han identificado los materiales con los que fue construido el teatro (piedra de Godella, ladrillo, revestidos con yeso o imitando piedra, madera, baldosas cerámicas etc) y se han asignado a las superficies las absorciones correspondientes.

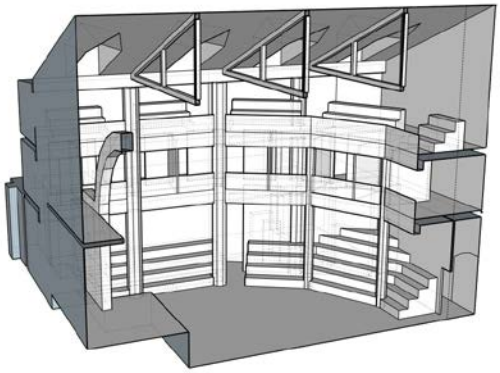


Fig 11. Modelo geométrico de la Nueva Casa de la Olivera.

En este caso, las auralizaciones que se pretenden crear en este edificio corresponden a actores declamando fragmentos de nuestro teatro clásico. En este caso la señal anecoica si puede obtenerse de la forma habitual y está actualmente en fase de realización.

Y por último, respecto al Monasterio Jerónimo de la Murta situado el Valle de la Murta (también llamado el viejo Valle de los Milagros –Vall dels Miracles, Alzira), fue fundado en el siglo XIV por un grupo de monjes que vinieron de otro monasterio Jerónimo de la zona (Sant Jeroni de Cotalba). El estudio de la fase final de este monasterio se presentó en Teniacústica 2014.

La primera iglesia del monasterio (Fig. 12a) estaba ubicada en lo que en la actualidad se reconoce como la sacristía y la nueva iglesia (Fig. 12b) estaba junto a la vieja, utilizando como se ha comentado la antigua iglesia como sacristía.

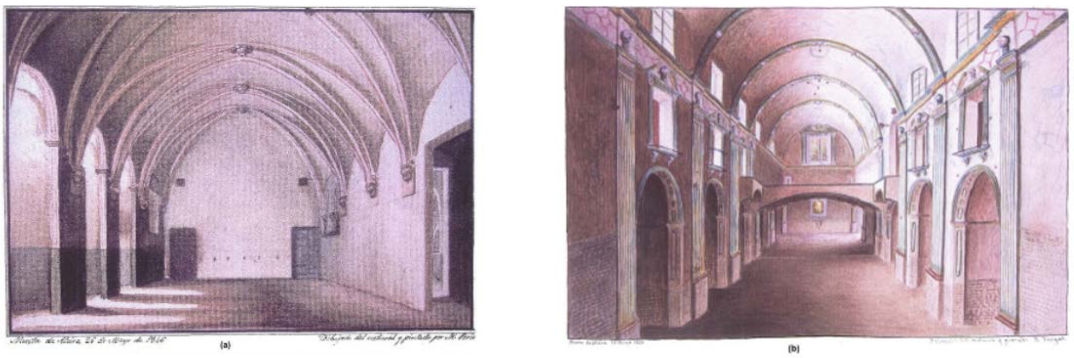


Figura 12. (a) Acuarelas de la sacristía pintadas por M.Peris. (a) Iglesia antigua. (b) La nueva iglesia de 1846

La arquitectura de la nueva iglesia mostraba un edificio tradicional con una nave con capillas entre contrafuertes. Una característica común en las iglesias de las órdenes mendicantes, como la de los Jerónimos, era un coro alto a los pies de la iglesia y una cancela alta y una austeridad en la decoración El uso del ladrillo permite una importante reducción de costes y una construcción más rápida.

Después de la desamortización de Mendizábal el monasterio fue abandonado y vendido a propietarios privados que abandonaron el edificio y fue degradándose hasta un estado de ruina que se refleja en la situación actual.

Para la rehabilitación virtual de la nueva iglesia del monasterio se realizó una campaña de medidas en las ruinas de la iglesia para obtener información tanto de medidas geométricas como de absorción de los materiales aun existentes. A partir de estos datos se ha desarrollado un modelo geométrico.

En el modelo se han usado materiales que se encontraron en la bibliografía referida sobre el monasterio, teniendo en cuenta las descripciones de la iglesia. En este momento, aún no se ha hecho un estudio de los materiales que se encontraron 'in-situ'. En la Figura 13 se muestran varias vistas del modelo de la iglesia. La simulación se ha realizado sin tener en cuenta la decoración de la iglesia (i.e. estatuas, pinturas, altar y retablo, órgano, etc.), porque en el modelo se considera la situación de la sala en 1846, cuando el templo ya estaba vacío.

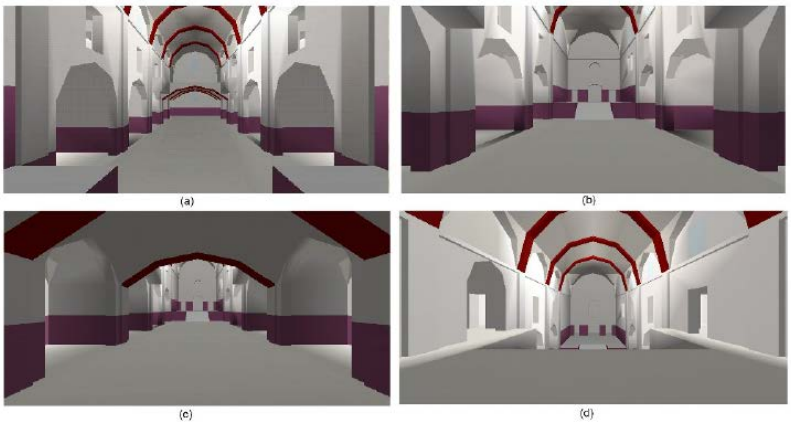


Figura 13. Diferentes vistas del modelo. (a) Desde el altar. (b) Desde la mitad de la iglesia. (c) Desde la parte posterior. (d) Desde el coro

Después de la simulación acústica, realizada con ODEON y fuente onmidireccional, los resultados muestran que esta iglesia (con sus 8000 m3 aproximadamente de volumen) era bastante reverberante y superior a los 2.2 s (valor óptimo según la expresión de Perez Miñana para las Iglesias) y el uso de revestimientos era necesario para diferentes propósitos (sermones, servicios musicales, etc.).

La auralización de una pieza musical de Mosen Vicent Olmos Claver, maestro de capilla en la última parte de la vida del monasterio (entre 1796 y 1812), y que corresponde al salmo llamado "Deus in adjutorium meum intende", compuesto para 4 voces, 2 violines, órgano y bajo continuo, permite recrear la música en este monasterio.

Con la exposición de estos dos casos, uno inexistente pero bien documentado y otro en ruinas, vemos que esta Metodología es aplicable al inmenso patrimonio cultural español inexistente o en ruinas y cuya reconstrucción virtual sería de interés general y particular para cada zona.

## CONCLUSIÓN

Dado que la conservación de la riqueza cultural de un país es quizá uno de sus bienes más importantes y también más vulnerables ya que está sujetos en ocasiones a fenómenos no controlables como catástrofes naturales, locuras o problemas presupuestarios que impidan su conservación, consideramos que gracias a las nuevas tecnologías y el avance en la técnica, la virtualización de todo el patrimonio permite que pueda ser archivado en bases de datos y disfrutarlo y tenerlo a disposición general.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por la concesión de los proyecto de investigación BIA2003-09306-C04-01, BIA2008-05485 y BIA2012-36896.

A los responsables de las salas y edificios patrimoniales.

Al Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG, integrado por Ana Planells, Jaume Segura, Salvador Cerdá y Arturo Barba, que han colaborado activamente en la preparación de esta conferencia.

## REFERENCIAS

Daumal F Tecniacústica'2013, Daumal

Davies WJ. Editorial of the Special Issue: Applied soundscapes. Applied Acoustics, vol 78, 2, pp 223, 2013

Brown AL, Kang J, Gjestland T. Towards standardization in soundscape preference assessment. Appl. Acoust. 72, 6, pp. 387–392, 2011

Romero J, Cerda S, Giménez A, Sanchis A, Marín A, Tur A. Tempo, ritmo y calidad sonora en la Mascletá. Acústica'2004 Guimaraes, Portugal

Zwicker E, Fastl H. Pasychoacoustics, Ed. Springer 1999

Lara A. Análisis acústico de una manifestación pirotécnica: "Mascletá". Rev. Acustica vol 3, 2-3 1972

Daumal F. Arquitectura Acústica 2, Rehabilitació. Edicions UPC, Barcelona, 2007

Pérez-Vidal C, Cerdá S, Montell R, Cibrián R, Segura J, Barba A, Querol L, Giménez A. Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad. TecniAcustica'2013, Valladolid

Pätynen J, Pulkki V, Lokki, T. Anechoic recording system for symphony orchestra, Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, 6, pp. 856-865, 2008.

Cerdá S, Segura J, Planells A, Cibrián R, Giménez A. Caracterización del coro como fuente extensa mediante un sistema de grabación multicanal para su uso en auralizaciones. TecniAcustica'2014, Murcia.

Planells A, Segura J, Cerdá S, Barba A, Cibrián R, Giménez A. Acústica virtual patrimonial. Aplicación a la auralización del Misteri d'Elx. Tecniacústica'2015, Valencia.

Barba A, Giménez A. El teatro principal de Valencia. Acústica y arquitectura escénica. Ed. Teatres de la Generalitat Valenciana y Universitat Politècnica de València, 2011.

Segura J, Barba A, Planells A, Cerdá S, Cibrián R, Giménez A. Acustica arqueológica: Reconstrucción de la Casa de la Olivera, teatro valenciano del siglo XVII. Tecniacústica'2015, Valencia.

Segura J, Barba A, Planells A, Cerdá S, Cibrián R, Giménez A. Auralización en la iglesia de un monasterio jerónimo en ruinas. Tecniacústica'2014, Murcia.

Auralización de la pieza musical "Deus in adjutorium meum intende" (íncipit del salmo 70) de Mosen Vicent Olmos Claver (1744-1800) en la iglesia de Santa María de la Murta (URL: http://goo.gl/VZNypx)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# PROPUESTA Y VALIDACIÓN DE UNA CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DE LOS ESPACIOS SONOROS DE UN ÁREA RURAL

**PACS: 43.50.Rq**

López Uribarri, L.; Marey Pérez, M.F.; González Vázquez, X.P.
GI-1716 Proyectos y Planificación. Dep. Enxeñería Agroforestal. Universidade de Santiago de Compostela. E.P.S. Campus Universitario de Lugo. 27002. España. Tel.+34. 670.542.146. E-mail: leiresau@gmail.com

## ABSTRACT

Every rural area has a particular soundscape, and in order to preserve it, we must develop some methodologies that could be able to characterize it. This study establishes a correlation between quantitative and qualitative variables that define the soundscape of a rural area in Lugo, Spain. We are able to distinguish different areas depending on its acoustic sources. We propose a multivariate classification technique to examine whether there are significant differences between these spaces about their $L_{eq}$ and $L_{90}$ indicators. We conclude that we can predict with a high degree of reliability what kind of sound sources are acting in a given space based on these indices.

## RESUMEN

Cada área rural tiene su paisaje sonoro, y para conservarlo, es fundamental desarrollar metodologías que lo definan. Este estudio establece una correlación entre variables cuantitativas y cualitativas que caracterizan los espacios sonoros de una zona rural de Láncara, Lugo, España. Se distinguen estos espacios en función de las fuentes dominantes y se propone una técnica de clasificación multivariante para analizar si existen diferencias significativas entre estos espacios respecto sus indicadores $L_{eq}$ y $L_{90}$. Se concluye que se puede predecir con elevado grado de fiabilidad qué tipo de fuentes sonoras están actuando en un determinado espacio en función de estos índices.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Es en los países desarrollados (entre ellos, España) donde actualmente más conciencia y más posibilidades existen para estudiar cómo conservar el medio ambiente. Cubiertas las necesidades básicas y superados los principales problemas de alimentación e inseguridad ciudadana, nos centramos en el Medio Ambiente. La contaminación de las aguas o la atmosférica son las que tienen un impacto “más vistoso” sobre los seres vivos, y multitud de leyes, decretos y normas se han desarrollado con el ánimo de paliar los impactos generados por este tipo de contaminación de manera equilibrada con las preferencias y necesidades del

ser humano. Pero otro tipo de contaminaciones como la lumínica o la acústica han quedado relegadas a un segundo plano y en cierto modo, en el olvido. Hoy en día, el ruido constituye uno de los factores más dañinos de la calidad, confortabilidad, y salud de nuestro entorno vital, y a pesar de que la contaminación acústica se remonta a tiempos muy lejanos, ha recibido poca atención hasta hace muy poco tiempo siendo mucho menos conocida y por lo tanto más difícil de controlar.

El desarrollo urbanístico e industrial, la extracción de los recursos naturales, las redes de transporte etc. conllevan un incremento del ruido antropogénico en todo el mundo, afectando, tanto al ser humano como a las especies terrestres y marinas. De hecho, los seres humanos han cambiado radicalmente el mundo sonoro con señales marcadamente diferentes en su tono y amplitud de la mayoría de los sonidos producidos en los hábitats naturales [1].

Los entornos rurales pueden llegar a ser lugares de unas características sonoras realmente especiales, en donde la baja actividad humana genera un predominio de las fuentes sonoras de origen natural en el paisaje sonoro. Existen trabajos que buscan una correlación entre parámetros físicos y la evaluación de los paisajes sonoros debido a que la evaluación cuantitativa del sonido por sí sola, y aunque se haya convertido en una norma en el estudio del ruido ambiental, no es suficiente a la hora de valorar estos paisajes. Es necesario que primero se propongan algunas figuras semánticas y se correlacionen con parámetros acústicos cuantificables [2], no siendo suficiente un estudio de los parámetros físicos para la caracterización de los sonidos ambientales [3]. Es primordial comprender los factores que influyen en la percepción del paisaje sonoro, conocer no sólo cuán intenso es el nivel sonoro existente, sino también cuál es la fuente sonora que lo origina [4].

Evitando la degradación del paisaje acústico de las áreas rurales y naturales potenciamos el bienestar de sus comunidades y de sus habitantes. La necesidad de concienciarse de la importancia de la conservación de estas áreas tranquilas o elevada calidad acústica como recurso medioambiental es cada vez mayor y hasta que no se reconozca este hecho las áreas aún existentes irán desapareciendo. En aras de fomentar la conservación de estos paisajes y controlar el impacto de las actividades antropogénicas, es primordial aunar esfuerzos para crear una base metodológica coherente, sólida y apoyada en medidas legisladas que facilite su caracterización y proporcione herramientas para su gestión sostenible.

Se plantea el presente estudio, donde, a partir de los datos de campo recogidos en un trabajo previo [5] se trata de establecer una relación entre variables cuantitativas y cualitativas que representen las fuentes sonoras que definen el paisaje acústico de una zona rural en Láncara, municipio de Lugo en Galicia, España.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Clasificación de los Espacios Sonoros

La Ley 37/2003 del Ruido establece la necesidad de estructurar el territorio en “áreas acústicas” entendiendo por tales, aquellas zonas del territorio que comparten idénticos objetivos de calidad acústica. La legislación actual clasifica estas áreas acústicas en función del uso predominante del suelo. En las zonas naturales o rurales, atribuir un determinado entorno acústico, o, fijar unos objetivos de calidad acústica en función del uso del suelo es un “sinsentido”. Lo propio, para poder determinar su calidad acústica y establecer pautas para su conservación, es clasificar las áreas en base a criterios cualitativos y cuantitativos en función de la naturaleza de las fuentes de ruido dominantes. Ésta es una tarea ardua.

En este estudio, se analizan los datos recogidos en campo en un trabajo realizado previamente [5], en el que se registró el nivel sonoro en 31 puntos de muestreo en un área rural de unas 720 ha, ubicada en el cuadrante Oeste del término municipal de Láncara, Lugo, Galicia (España).

Tratamos de clasificar los espacios sonoros de esta área en función del tipo de fuente sonora dominante. Para lo cual, se ha realizado un proceso en dos etapas: la primera de ellas en la zona y momento al tomar las muestras de campo, basándonos en lo escuchado durante la toma de datos; y la segunda, en su mayor parte ratificación, en laboratorio al volver a escuchar las grabaciones sonoras registradas en campo.

Tal y como se refleja en la siguiente tabla, se han agrupado los puntos de medición en 4 grupos:

I. El primer grupo en el que se han registrado un total de 11 muestras se han identificado ruidos asociados a *fuentes antropogénicas* que permiten, por su importancia, clasificar dicha zona.

II. Un segundo grupo, formado por un total de 12 puntos de muestreo, sería el que se ha clasificado como *naturaleza + fuentes antropogénicas*. En este grupo, las fuentes antropogénicas representadas también en el grupo anterior, ejercen una influencia similar en el espacio sonoro a las de origen natural.

III. El tercer grupo está formado por 4 muestras, clasificado como *naturaleza: río + fuentes antropogénicas*, se trata de la combinación de las fuentes de origen antrópico y una fuente natural con niveles sonoros constantes y elevados, el río.

IV. El último grupo también formado por 4 muestras, *naturaleza*, se asocia con la presencia exclusiva de ruido procedente de los cursos fluviales o de elementos de la naturaleza.

Los datos numéricos obtenidos para los diferentes indicadores (niveles percentiles), también nos permiten caracterizar estas áreas de forma matemática.

El interés se centra en establecer un modelo matemático que permita comprobar de manera estadística la correspondencia entre la clasificación cualitativa por observación y la estadística obtenida de las relaciones entre los valores de los indicadores de cada grupo.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de los puntos de muestreo en esos 4 grupos y los valores de los niveles sonoros equivalente y percentiles obtenidos en cada punto:

| | PUNTO | $L_{eq}$ (dBA) | $L_{90}$(dBA) | $L_{50}$(dBA) | $L_{10}$(dBA) | FUENTES EMISORAS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Día | | | | |
| FUENTES ANTROPOGÉNICAS | 4 | 57,9 | 44,9 | 50,1 | 62,6 | Tráfico rodado ;Gente |
| | 6 | 50,6 | 41,3 | 45,6 | 52,9 | Asentamiento rural: perros |
| | 8 | 64,0 | 31,2 | 35,5 | 59,3 | Tráfico rodado |
| | 14 | 53,1 | 40,1 | 43,7 | 48,9 | Cantera; Asentamiento rural: perros, gente |
| | 15 | 46,6 | 39,2 | 42,5 | 48,5 | Cantera; Tráfico rodado; Asentamiento rural: perros, gente; Naturaleza |
| | 17 | 39,1 | 36,3 | 38,2 | 41,0 | Cantera; Asentamiento rural: perros, gallos |
| | 18 | 33,3 | 30,8 | 32,6 | 35,0 | Cantera |
| | 19 | 47,9 | 44,7 | 47,6 | 49,3 | Cantera |
| | 27 | 42,5 | 34,8 | 39,5 | 44,4 | Naturaleza:pájaros; Trabajos agrícolas; Ferrocarril; Asentamiento rural: gallos, perros |
| | 28 | 45,6 | 38,3 | 42,1 | 49,2 | Asentamiento rural:perros; Tráfico rodado; Obras AVE |
| | 29 | 45,9 | 32,5 | 37,4 | 46,9 | Asentamiento rural: perros, tractor agrícola, gente, gallos; Tráfico rodado |
| NATURALEZA + FUENTES ANTROPOGÉNICAS | 10 | 39,0 | 33,8 | 36,6 | 40,6 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 11 | 44,1 | 40,1 | 41,3 | 44,7 | Trabajos forestales; Naturaleza: pájaros, río |
| | 12 | 39,6 | 35,1 | 38,6 | 42,1 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 13 | 35,2 | 29,8 | 32,1 | 38,9 | Naturaleza: pájaros; Trabajos forestales |
| | 16 | 27,1 | 24,5 | 25,7 | 28,4 | Naturaleza: pájaros; Cantera; Ferrocarril |
| | 20 | 33,7 | 29,2 | 32,4 | 36,4 | Naturaleza; Tráfico rodado |
| | 21 | 32,5 | 29,1 | 31,2 | 34,7 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 24 | 31,6 | 27,7 | 29,1 | 32,1 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 25 | 39,6 | 30,2 | 33,1 | 43,4 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 26 | 35,1 | 30,8 | 33,0 | 36,8 | Naturaleza; Tráfico rodado y ferroviario |
| | 30 | 44,9 | 41,2 | 43,0 | 47,2 | Naturaleza; Obras AVE |
| | 31 | 38,9 | 36,5 | 37,9 | 40,7 | Naturaleza; Obras AVE; Tráfico rodado |
| NATURALEZA: RÍO + FUENTES ANTROPOGÉNICAS | 1 | 55,5 | 54,3 | 55,3 | 56,3 | Obras AVE; Naturaleza:río |
| | 2 | 52,2 | 48,9 | 50,7 | 54,2 | Obras AVE; Naturaleza:río |
| | 7 | 45,8 | 44,9 | 45,6 | 46,6 | Naturaleza:río; Trabajos forestales |
| | 9 | 48,0 | 46,8 | 47,4 | 49,0 | Naturaleza:río; Trabajos forestales |
| NATURALEZA | 3 | 44,8 | 44,0 | 44,6 | 45,5 | Naturaleza:río |
| | 5 | 55,8 | 54,9 | 55,8 | 56,3 | Naturaleza:río |
| | 22 | 35,0 | 30,3 | 33,1 | 36,1 | Naturaleza |
| | 23 | 34,9 | 30,8 | 33,1 | 36,5 | Naturaleza |

Tabla 1. Clasificación cualitativa. Valores medios de los percentiles y fuentes emisoras dominantes por punto de muestreo.

## 2.2. Análisis Preliminar de los Datos

Los resultados correspondientes a los cuatro indicadores (o cuatro grupos), muestran diferentes características de los índices sonoros. Se analizan los valores de $L_{eq}$ y de $L_{90}$ por presentar diferencias notables entre ellos en cada medición y ser representativos de la influencia de los eventos sonoros y del nivel del medio ambiente natural respectivamente. Tratamos, a partir de la relación entre los mismos para los diferentes grupos, obtener un modelo de clasificación.

En la figura siguiente se muestra la representación de los valores de los 31 puntos para los indicadores seleccionados $L_{eq}$ y $L_{90}$.

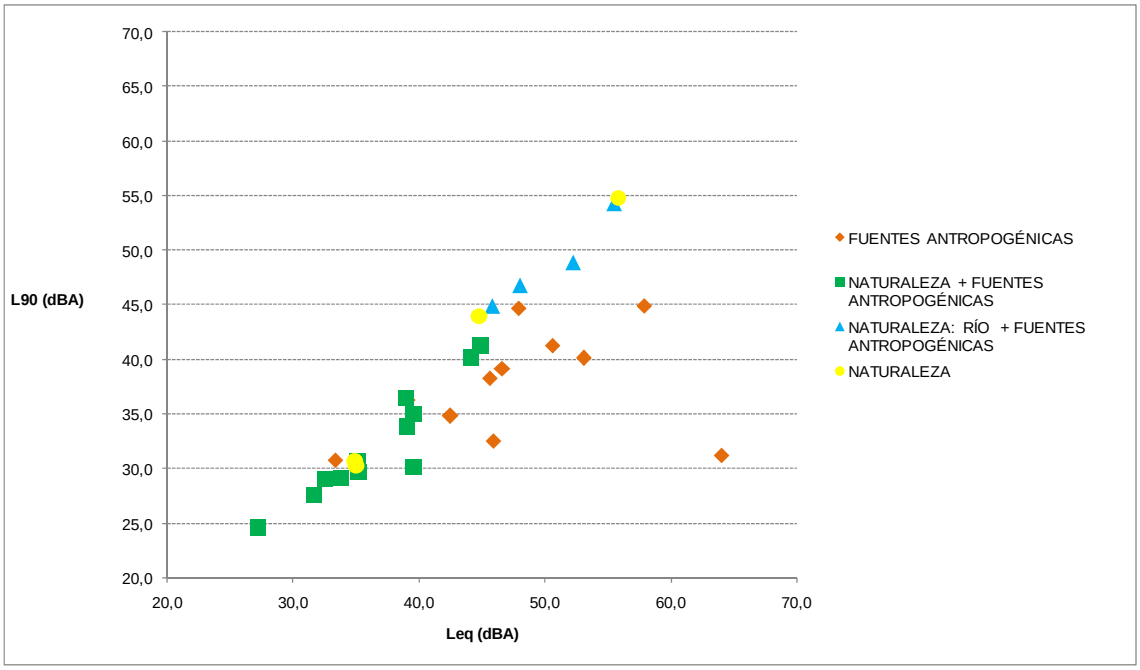



Figura 1. Distribución de las muestras en función de $L_{90}$ y $L_{eq}$

La gráfica muestra, en primer lugar, que a pesar de presentar una superposición parcial entre las muestras de los valores de ambos indicadores sí parece existir cierta diferencia espacial entre los grupos. Las herramientas estadísticas de clasificación multivariante pueden ayudarnos a analizar la existencia o no de grupos entre las muestras y si estos grupos se corresponden o no con la clasificación cualitativa propuesta.

### 2.3. Elección del Método Multivariante

Analizando los datos que tenemos, observamos que existe un análisis de dependencia dado que la clasificación cualitativa propuesta (valores de 1 a 4) es dependiente de los datos numéricos de los indicadores ($L_{eq}$) y ($L_{90}$). Además, la única variable dependiente es categórica, no métrica. Consecuentemente, una técnica apropiada y por la cual optamos es el *Análisis Discriminante,* comúnmente denominado por sus siglas en inglés DA Discriminant Analysis [6]. Se trata de una técnica estadística multivariante cuya finalidad es analizar si existen diferencias significativas entre grupos de objetos respecto a un conjunto de variables medidas sobre los mismos para, en el caso de que existan, explicar en qué sentido se dan y proporcionar procedimientos de clasificación sistemática de nuevas observaciones de origen desconocido en uno de los grupos analizados.

Dada la dificultad para la obtención de los datos, se ha optado por introducirlos todos en el modelo no dejando la posibilidad de validación posterior con otros datos. Esta decisión es coherente con trabajos de este tipo en los que la obtención de información resulta de extremada complejidad y resulta necesaria para el desarrollo del modelo.

## 3. RESULTADOS

De manera previa a los estadísticos de clasificación, se ha realizado una *ANOVA* con estadísticos F para contrastar la hipótesis de igualdad de medias entre los grupos en cada variable independiente obteniendo como resultado un p_valor<0,05 y por lo tanto que los dos grupos ($L_{eq}$ y $L_{90}$) en media, son diferentes. También se ha realizado la prueba *M de Box* y su transformación en un estadístico F, en donde se contrasta la hipótesis nula de que las matrices de covarianzas son iguales obteniendo también un Sig=0,000<0,05, concluyendo que los dos

grupos tienen distinta matriz de varianzas-covarianzas, es decir, que los grupos tienen diferente variabilidad entre sí. Se ha analizado también el estadístico *Lambda de Wilks*, para medir el poder discriminante de las variables de estudio y pudiendo concluir que la variable que más contribuye a la discriminación es el indicador $L_{90}$. No obstante, no se detalla el procedimiento realizado por ser demasiado extenso para tratar en esta comunicación.

Estudiando los estadísticos de clasificación, en la tabla 2 se muestran las probabilidades a priori de pertenecer a los grupos. Y en la tabla 3, se muestran los coeficientes para la función de clasificación (funciones discriminantes lineales de Fisher, método de cálculo descrito en Figueras [7].

| PUNTO | Previas | Casos utilizados en el análisis | |
|---|---|---|---|
| | | No ponderados | Ponderados |
| 1 | ,355 | 11 | 11,000 |
| 2 | ,387 | 12 | 12,000 |
| 3 | ,129 | 4 | 4,000 |
| 4 | ,129 | 4 | 4,000 |
| Total | 1,000 | 31 | 31,000 |

Tabla 2. Probabilidades *a priori* de pertenencia a grupos

| | PUNTO | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $L_{eq}$ (dBA) | ,651 | ,400 | ,417 | ,389 |
| $L_{90}$(dBA) | ,497 | ,555 | ,984 | ,770 |
| (Constante) | -25,974 | -17,267 | -36,533 | -25,753 |

Tabla 3. Coeficientes de la función de clasificación

Los resultados nos indican que la clasificación para ambos indicadores es:

$$L_{90} = 0{,}497 \cdot Gr1 + 0{,}555 \cdot Gr2 + 0{,}984 \cdot Gr3 + 0{,}770 \cdot Gr$$

$$L_{eq} = 0{,}651 \cdot Gr1 + 0{,}400 \cdot Gr2 + 0{,}417 \cdot Gr3 + 0{,}389 \cdot Gr4$$

Los gráficos siguientes nos muestran la situación de cada uno de los grupos en relación con las funciones canónicas discriminantes, indicando mediante un cuadrado el centroide de cada grupo.

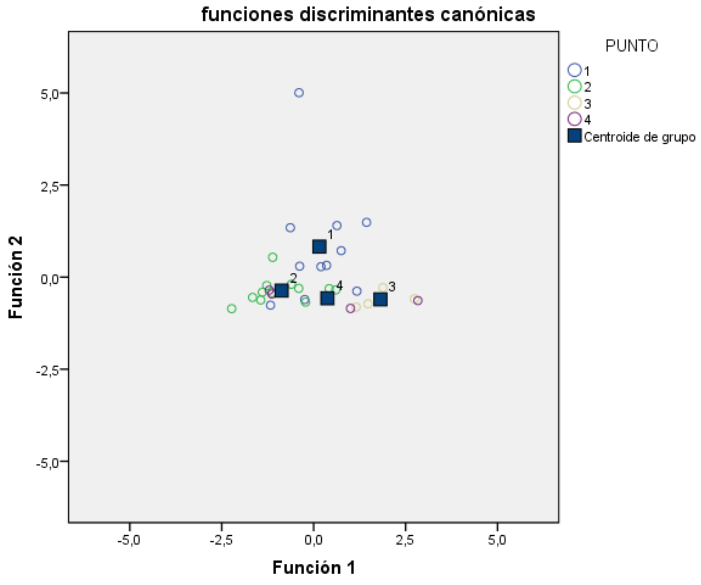



Figura 2. Funciones discriminantes canónicas del conjunto

Finalmente, la tabla siguiente muestra los resultados obtenidos en el modelo:

| | | PUNTO | Grupo de pertenencia pronosticado | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Original | Recuento | 1 | 7 | 3 | 1 | 0 | 11 |
| | | 2 | 2 | 10 | 0 | 0 | 12 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| | | 4 | 0 | 2 | 1 | 1 | 4 |
| | % | 1 | 63,6 | 27,3 | 9,1 | ,0 | 100,0 |
| | | 2 | 16,7 | 83,3 | ,0 | ,0 | 100,0 |
| | | 3 | ,0 | ,0 | 100,0 | ,0 | 100,0 |
| | | 4 | ,0 | 50,0 | 25,0 | 25,0 | 100,0 |
| Validación cruzada | Recuento | 1 | 7 | 3 | 1 | 0 | 11 |
| | | 2 | 2 | 10 | 0 | 0 | 12 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3 | 1 | 4 |
| | | 4 | 0 | 2 | 2 | 0 | 4 |
| | % | 1 | 63,6 | 27,3 | 9,1 | ,0 | 100,0 |
| | | 2 | 16,7 | 83,3 | ,0 | ,0 | 100,0 |
| | | 3 | ,0 | ,0 | 75,0 | 25,0 | 100,0 |
| | | 4 | ,0 | 50,0 | 50,0 | ,0 | 100,0 |

Tabla 12. Resultados del modelo

Como se observa el modelo clasifica bien el 71% de los casos y cuando es sometido a validación cruzada (más exigente) sigue manteniendo un porcentaje de datos bien clasificados próximo al 65%. Estos resultados se pueden considerar como muy buenos cuando se trabaja con pocos datos y con cuatro posibles grupos. Un análisis detallado muestra como los grupos 3 (100%) y 2 (83,3%) son con los que mejor se comporta en modelo para predecir. En el extremo opuesto se sitúan los grupos 1 (63,6%) y grupo 4 (25%).

Es muy destacable el éxito del modelo para clasificar por encima del 60% en el caso de tres grupos y el valor bajo del grupo 4 obligaría a la obtención de un mayor número de registros para mejorar estos resultados.

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha utilizado una técnica de clasificación multivariante conocida como Análisis Discriminante (DA) con la finalidad de analizar si existen diferencias significativas entre los cuatro grupos de puntos de muestreo diferenciados por la naturaleza de las fuentes sonoras dominantes respecto a los índices sonoros $L_{eq}$ y $L_{90}$, con lo cual, podremos afirmar si con los valores de estos dos índices podemos predecir, y con qué grado de fiabilidad, qué tipo de fuentes sonoras están actuando en el entorno acústico del punto muestreado.

De acuerdo con lo que afirman diversos autores [4], [8], [9], el $L_{eq}$ es un índice muy sensible a los eventos sonoros, y tal y como se ha podido comprobar en campo, aumenta su valor rápidamente con cualquier evento que genere un elevado nivel acústico aunque sea de corta duración, por esto, se asocia más a los sonidos emitidos por las fuentes antropogénicas siempre y cuando éstas se presenten como eventos sonoros. Sin embargo, el $L_{90}$ se asocia más con el ruido de fondo, que se considera como el sonido emitido por la naturaleza, de más bajo nivel acústico, que toma valores más constantes y no se ve tan influenciado por los eventos sonoros.

No existen actualmente muchos estudios que traten de obtener una relación estadística entre los parámetros que caracterizan la naturaleza de las fuentes sonoras. Algunos autores sí han

tratado de clasificar el tipo de fuente existente o de cuantificar de alguna manera la influencia antrópica, bien con el empleo de $L_{eq}$ y $L_{90}$ o proponiendo otros parámetros [9], [10], [11]. En este trabajo se ha demostrado que el método cualitativo de clasificación de espacios sonoros propuesto y validado estadísticamente, permite clasificar con fiabilidad las zonas en función del entorno y las fuentes sonoras. Partiendo de la base de que los índices $L_{eq}$ y $L_{90}$ son los más representativos del sonido antropogénico y natural respectivamente, podemos intuir si el ambiente acústico existente en un lugar está caracterizado por los sonidos emitidos por fuentes de origen antrópico o natural, e incluso, podemos intuir si existen cursos fluviales que influyan en el paisaje sonoro.

La clasificación de los espacios sonoros basándonos en la correlación existente entre las variables cualitativas y cuantitativas, otorga una nueva visión a los estudios realizados hasta ahora y abre una puerta para continuar investigando y aplicando las técnicas estadísticas bien como base o bien como complemento para la evaluación de los paisajes sonoros.

## 5. REFERENCIAS

[1] Francis, C.; Ortega, C.; Cruz, A. (2009). Noise pollution changes avian communities and species interactions. Current Biology. 19(6): 1415-1419.

[2] Brown, A.L. (2011). Advancing the concepts of soundscapes and soundscape planning. Acoustics 2011. Gold Coast, Australia, 2-4 November. p. 15.

[3] Genuit, K. and Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. Acta Acustica United with Acustica. 92(6): 952-958.

[4] Barrigón, J.M.; Montes, D.; Merchán, A.; Atanasio, P.; Gómez, V.; Vílchez-Gómez, R.; Méndez, J.A.; Rey, G.; Prieto, C.; Maderuelo, R.; Martín, M.; Trujillo, J.; Carmona, J. (2013). Caracterización del paisaje sonoro rural. Alcántara, un pueblo de la Raya Extremeña. Tecniacústica 2013, Valladolid, España, 2-4 octubre.

[5] López, L. (2011). Planificación acústica. Estudio y conservación del paisaje sonoro en un contexto rural. Tesis de Máster. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza.

[6] Peña Sánchez de Rivera, D. (2002). Análisis de datos multivariantes. McGraw-Hill. New York.

[7] Figueras, S.M. (2000). Análisis Discriminante. 5campus.com, Estadística (09-2014). Disponible en: http://www.5campus.com/leccion/discri

[8] Botteldooren, D; Decloedt, S.; Bruyneel, J.; Pottie, S. (1999). Characterisation of quiet areas: subjective evaluation and sound levels indices. Forum Acusticum 1999, Berlin, Germany, 15-19 March.

[9] Carvalho, A. and Pereira, M. (2013). Ruído no Parque Nacional da Peneda-Gerês, Portugal. Tecniacústica 2013, Valladolid, España, 2-4 octubre.

[10] Feijoó, S. (2008). Clima sonoro en espacios naturales. VI Congreso Iberoamericano de acústica - FIA 2008. Buenos Aires, Argentina.

[11] Feijoó, S. (2008). Niveles sonoros en un municipio rural. VI Congreso Iberoamericano de acústica - FIA 2008. Buenos Aires, Argentina.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# PATINILLOS DE VENTILACIÓN: FUENTE DE RUIDO Y PROPUESTA DE SOLUCIONES ACÚSTICAS

PACS 43.55.Rg

Herranz García, Silvia
Analista Técnico en URSA Ibérica Aislantes S.A.
España
E-mail: silvia.herranz@ursa.com

**ABSTRACT:**

Vent Stacks are one of the noise sources inside of a dwelling, and generate more trouble, because they can connect differences floors of building.
The variety of solutions can be implemented, are important to avoid the noise transmission through this holes, being outstanding the previous study and focus in the differences transmission paths.

**RESUMEN:**

Los patinillos de ventilación son una de las fuentes interiores de ruido de una vivienda, y que más molestias generan, debido a que pueden conectar diferentes plantas de un edificio. La variedad de soluciones que se puedan implementar en ellos, son importantes para evitar la transmisión del ruido a través de estos huecos, siendo relevante el estudio previo y poniendo especial interés en las posibles vías de transmisión.

# PATINILLOS DE VENTILACIÓN: FUENTE DE RUIDO Y PROPUESTA DE SOLUCIONES ACÚSTICAS

## 1. INTRODUCCIÓN:

Los edificios residenciales son un porcentaje elevado del parque inmobiliario en España, los cuales están dotados de todo tipo de equipamiento, ya sea a nivel de barrio, que pueden ser fuentes de ruidos externas al propio inmueble, así como instalaciones y servicios propios, que se pueden convertir en fuentes de ruido inherentes, debido a funcionamiento habitual del edificio.

Las fuentes de ruido internas de los edificios, son debidas en su mayoría al uso de las instalaciones propias de las viviendas y locales, así como las comunes a ellos. Por lo que son fuentes que pueden estar en funcionamiento a cualquier hora del día o incluso de la noche. El periodo nocturno es el más crítico debido a la disminución de decibelios generados en el interior del edificio como del exterior, viéndose disminuido el confort de los usuarios del inmueble.

Los edificios, constan de un entramado de conductos y tuberías de instalaciones que los recorren tanto en vertical como en horizontal, ocasionando los pertinentes ruidos, por lo que los patinillos donde se alojan estos elementos, deben tener un tratamiento acústico, para evitar cualquier vía de transmisión del ruido.

## 2. PATINILLOS: FUENTE DE RUIDO

Los patillos de ventilación son huecos que atraviesan las plantas del edificio, por lo que pueden generar transmisión de ruidos no solo con las plantas inmediatamente superior o inferior sino con cualquier planta del edificio. Aunque no son las fuentes más molestas, pueden llegar a disminuir considerablemente el confort interior de los edificios debido al ruido generado en estos huecos.

Para evitar cualquier transmisión de ruido, en un diseño inicial de los patinillos, se tendrá en cuenta las siguientes indicaciones:

- La proximidad de los recintos habitables o protegidos a los patinillos, intentando en la medida de lo posible situarlos en las zonas comunes y recintos habitables, alejando lo máximo posible de los recintos protegidos.

  En el caso de que no se puedan desviar de los recintos protegidos, se tendrán en cuenta una serie de tratamientos especiales a las bajantes, tales como el adecuado forrado o el uso de tuberías multicapa para atenuar los ruidos producidos por la instalación, y haciendo hincapié en los codos y desvíos.

- Los requerimientos acústicos inherentes del uso de estos recintos. La siguiente tabla indica los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo que exige la Normativa vigente (Documento básico de Protección frente al ruido, DB HR):

| Tipo de Instalación | RA del patinillo |
|---|---|
| **Conductos de ventilación, que discurran por una unidad de uso** | |
| Patinillos con conductos de ventilación / Climatización | **$R_A \geq 33$ dBA** |
| Patinillo de extracción de humos de garaje | **$R_A \geq 45$ dBA** |
| Conductos con velocidad de circulación del $V_{aire} > 10$ m/s | Se realizara un estudio específico sobre los niveles de ruidos emitidos |
| **Patinillo chimenea de calderas centralizadas** | **$R_A \geq 45$ dBA** |
| **Bajantes (pluviales y residuales)** | **$R_A \geq 33$ dBA** |
| **Tuberías de instalaciones hidráulicas** | **$R_A \geq 45$ dBA** |

- Uso de abrazaderas desolidarizadas o elementos antivibratorios, para evitar la transmisión de vibraciones a los elementos estructurales o paramentos que puedan trasmitirlos a otros elementos del edificio. En los casos en que las instalaciones no discurran por patinillos, se tomaran medidas de sellado de holguras o uso de pasatubos de material elástico para evitar las trasmisiones.



Figura 1: Abrazaderas desolidarizadas

El replanteo de los patinillos desde su fase de diseño, pueden evitar la pérdida de aislamiento acústico entre recintos, e incluso el disconfort del recinto donde está ubicado. Además de las indicaciones anteriores, existen algunos puntos a tener en cuenta a la hora de realizar ese correcto replanteo:

- No se adosan los patinillos a los elementos de separación verticales, hay que mantener la solución constructiva , como muestra la siguiente imagen, hay que realizar una trasdosado a modo de cajón, para evitar el puente acústico a lo largo del encuentro con el conducto de ventilación

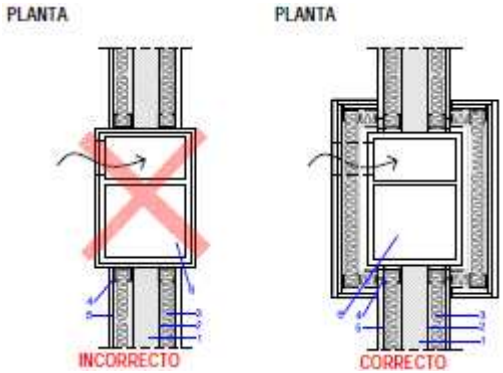



Figura 2: Patinillos como elementos de separación vertical

- Conectando hojas de los cerramientos de separación vertical o sustituyendo alguno de ellos. Los elementos que componen al cerramiento vertical son recomendables para realizar el trasdosado del encuentro con el conducto de ventilación. En la siguiente imagen se puede visualizar como el elemento de separación vertical es de tabiquería seca, con lanas minerales URSA TERRA y placas de yeso laminado, por lo que el trasdosado para cajear el patinillo, será con los mismos materiales. El Documento Básico de Protección frente al ruido (DB HR) específica que para el caso de conductos de instalaciones la solución constructiva que se utiliza tiene que ser RA ≥ 33 dBA.

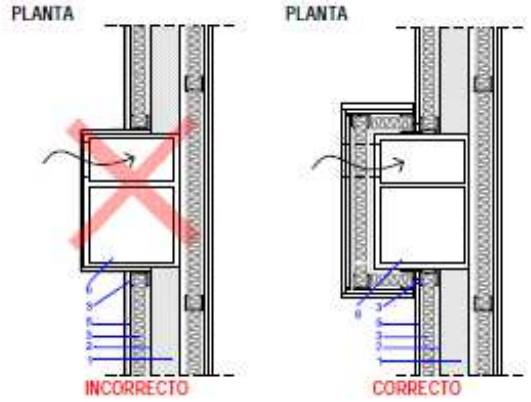



Figura 3: Patinillo como conectando hojas de separación vertical

- Evitar que el patinillo sea compartido por las unidades de uso, dado que se produce una trasmisión directa a través de las rejillas de ventilación. En la siguiente imagen se muestra como se tiene en cuenta el espacio dimensionado para cada recinto sin compartirlo.

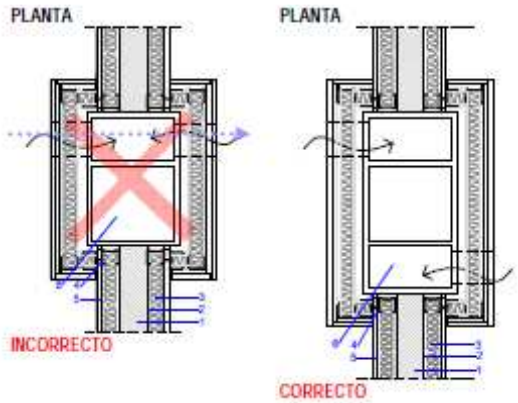



Figura 4: Patinillo compartido para unidades de uso

## 3. PATINILLOS: PROPUESTA DE SOLUCIONES ACÚSTICAS:

Existen diferentes soluciones constructivas en el mercado, para resolución de las transmisión de ruido de los patinillos con los recintos colindantes, este apartado se centra en soluciones de tabiquería seca, formada con estructuras autoportante metálicas rellenas de lana mineral URSA TERRA y placas de yeso laminado.



Figura 5: Solución constructiva de placas de yeso laminado y lana mineral URSA TERRA

Donde las exigencias acústicas no son muy elevadas, se pueden utilizar las siguientes soluciones:

La primera solución, consiste en una estructura autoportante metálica de 48 mm rellena de una lana mineral URSATERRA de 45 mm y dos placas de yeso laminado como acabado interior, es la menos aislamiento acústico a ruido aéreo proporciona:

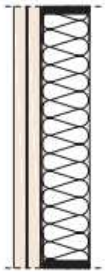
| 12.5+12.5+48(MW) | | Aislamiento acústico Rw(C;Ctr)dB RA-dBA | Peso medio aproximado (Kg/m²) | Aislamiento Térmico R(m²K/W) | Referencia ensayo |
|---|---|---|---|---|---|
|  | - Trasdosado autoportante PYL 73/600 (48) MW (12.5+12.5+48)<br>- Lana mineral autoportante 40/50 mm.<br>- Trasdosado **sin arriostrar.** | Rw= 38(-1;-5)dB<br>RA= 37,6 dBA | 20,3 | 0,36+RM | CTA-257/11/AER-2 |

Figura 6: Ensayo CTA-257/11/AER-2

Siendo los siguientes valores los obtenidos en el ensayo CTA-257/11/AER-2:

$$R_W = 38\ (-1\ ;\ -5)\ dB$$
$$R_A = 37{,}6\ dBA$$

La segunda solución, consiste en una estructura autoportante metálica de 70 mm rellena de una lana mineral URSATERRA de 65 mm y tres placas de yeso laminado como acabado interior, es la que mayor aislamiento acústico a ruido aéreo proporciona:

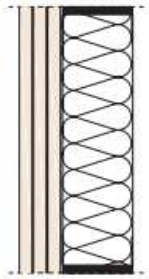
| 12,5+12,5+12,5+70(MW)  | | Aislamiento acústico Rw(C;Ctr)dB RA-dBA | Peso medio aproximado (Kg/m²) | Aislamiento Térmico R(m²K/W) | Referencia ensayo |
|---|---|---|---|---|---|
| | -Trasdosado autoportante PYL 107,5/600 (70) MW (12.5+12.5+12.5+70)<br>- Lana mineral autoportante 60/70 mm.<br>- Trasdosado **sin arriostrar** | Rw= 42[-1;-6]dB<br>RA= 41,6dBA | 30,1 | 0,41+RAT | CTA-258/11/AER-2 |

Figura 7: Ensayo CTA-258/11/AER-2

Siendo los siguientes valores los obtenidos en el ensayo CTA-258/11/AER-2:

$$R_W = 42\ (-1\ ;\ -6)\ dB$$
$$R_A = 41{,}6\ dBA$$

Si las fuentes de ruido localizadas en el interior de los patinillos se prevén más elevadas, como en el caso de extracción de humos de garaje, que con las anteriores soluciones no llegaríamos a mitigar los decibelios generados, existen otras tres soluciones que aportan mayores valores de aislamiento a ruido aéreo, como serían:

Solución 1, que consiste en una estructura autoportante metálica de 60 mm rellena de una lana mineral URSATERRA de 45 mm y placa de yeso laminado DFH2 de 19 mm por la cara interior del patinillo y una placa de yeso laminado de 15 mm:

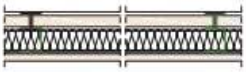
| 60(19DFH2+MW)+15  | | Aislamiento acústico Rw(C;Ctr)dB RA-dBA | Peso medio aproximado (Kg/m²) | Aislamiento Térmico R(m²K/W) | Referencia ensayo |
|---|---|---|---|---|---|
| | - Cerramiento para hueco 75/600 [60 (19DFH2 +MW) +15DF].<br>- Una Placa de yeso laminado 15 mm del tipo DF y una de 19 mm DFH2.<br>- Estructura metálica específica de 60 mm a base de montantes separados 600 mm y canales.<br>- Ancho terminado de 75 mm.<br>Lanas minerales 40/50 mm. | Rw= 48[-5;-12]dB<br>RA= 43,9 dBA | 34,1 | 0,39+RAT | CTA-346/11/AER-2 |

Figura 8 : Ensayo CTA-346/11/AER-2

Siendo los siguientes valores los obtenidos en el ensayo CTA-346/11/AER-2:

$$R_W = 48\ (-5\ ;\ -12)\ dB$$
$$R_A = 43{,}9\ dBA$$

Solución 2, que consiste en una estructura autoportante metálica de 60 mm rellena de una lana mineral URSATERRA de 45 mm y placa de yeso laminado DFH2 de 19 mm por la cara interior del patinillo y doble placa de yeso laminado de 15 mm:

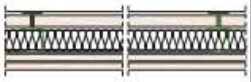
| | | Aislamiento acústico Rw(C;Ctr)dB RA-dBA | Peso medio aproximado (Kg/m²) | Aislamiento Térmico R(m²K/W) | Referencia ensayo |
|---|---|---|---|---|---|
| 60(19DFH2+MW)+15+15  | - Cerramiento para hueco 90/600 [60 (19DFH2+ MW)+ 15DF+15DF]<br>- Placa de yeso laminado 19 mm del tipo DFH2<br>- Estructura metálica específica de 60 mm a base de montantes separados a 600 mm y canales.<br>- 2 Placas de yeso laminado 15 mm del tipo DF.<br>- Ancho terminado de 90 mm.<br>- Lana mineral 40/50 mm. | Rw= 52(-7;-15)dB<br>RA= 46,2 dBA | 47,1 | 0,45+RAT | CTA-347/11/AER-2 |

Figura 9: Ensayo CTA-347/11/AER-2

Siendo los siguientes valores los obtenidos en el ensayo CTA-347/11/AER-2:

$$R_W = 52\ (-7\ ;\ -15)\ dB$$
$$R_A = 46{,}2\ dBA$$

Solución 3, que consiste en una estructura autoportante metálica de 60 mm rellena de una lana mineral URSATERRA de 45 mm y placa de yeso laminado DFH2 de 19 mm por la cara interior del patinillo y triple placa de yeso laminado de 15 mm:

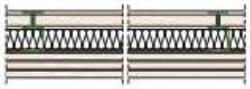
| | | Aislamiento acústico Rw(C;Ctr)dB RA-dBA | Peso medio aproximado (Kg/m²) | Aislamiento Térmico R(m²K/W) | Referencia ensayo |
|---|---|---|---|---|---|
| 60(19DFH2+MW)+15+15+15  | - Cerramiento para hueco 105/600 [60 (19 DFH2+MW)+15DF+15DF+15DF].<br>- Placa de yeso laminado 19 mm del tipo DFH2<br>- Estructura metálica específica de 60 mm a base de montantes separados a 600 mm y canales.<br>- 3 Placas de yeso laminado 15 mm del tipo DF.<br>- Ancho terminado de 105 mm.<br>- Lanas minerales 40/50 mm. | Rw= 54(-7;-15)dB<br>RA= 48,4 dBA | 60,1 | 0,51+RAT | CTA-349/11/ AER-2 |

Figura 10: Ensayo CTA-349/11/AER-2

Siendo los siguientes valores los obtenidos en el ensayo CTA-349/11/AER-2:

$$R_W = 54\ (-7\ ;\ -15)\ dB$$
$$R_A = 48{,}4\ dBA$$

El replanteo de la localización de los patinillos, hace que se pueda realizar un correcto cajeado para evitar cualquier vía de trasmisión del ruido. Si se parte de una conexión con tabiquería simple, formada por doble placa de yeso laminado a ambos lados de una estructura autoportante metálica rellena de lana mineral URSA TERRA, se puede terminar el cajeado con una de las dos primeras soluciones planteadas, teniendo en cuenta las uniones de las soluciones.
En el caso de patinillos de instalaciones y ascensores, la propuesta de solución sería la siguiente:

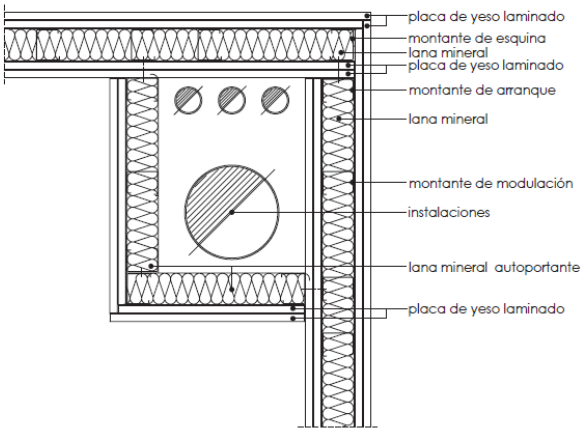



Figura 11: Patinillo de instalaciones

En el caso de patinillos de extracción de humos de garaje, la propuesta de solución sería la siguiente:

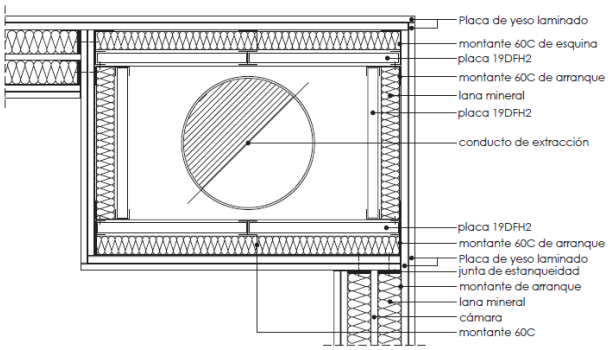



Figura 12: Patinillo de extracción de humos de garaje

## 4. CONCLUISONES:

Los patinillos son fuentes inherentes del uso de los edificios, por lo que se tienen que tener en cuenta desde la fase inicial de diseño, lo que permitirá disminuir la transmisión de ruidos, y junto a la utilización de soluciones testadas, como las anteriormente citadas, se podrá lograr el cumplimiento de la normativa Vigente.

La obtención de los valores de las soluciones propuestas, se conseguirá con una correcta ejecución, que juega un papel muy importante en la el número de decibelios que se obtendrán en las mediciones in situ que se realizaran en las comprobaciones de final de obra.

## 5. REFERENCIAS:

Manual de aislamiento. URSA IBERICA AISLANTES S.A.
Acústica Ambiental: Análisis, Legislación Y soluciones. Sociedad Española de Acústica.
Guía de Soluciones Constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE.
Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido versión V.02 Septiembre de 2014.
CSIC.

Figura 1. Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido versión V.02 Septiembre de 2014.
Figura 2. Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido versión V.02 Septiembre de 2014.
Figura 3. Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido versión V.02 Septiembre de 2014.
Figura 4. Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido versión V.02 Septiembre de 2014.
Figura 5. URSA Ibérica Aislantes S.A.
Figura 6. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 7. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 8. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 9. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 10. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 11. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE
Figura 12. Guía de soluciones constructivas con placa de yeso laminado y lana mineral para el cumplimiento del CTE

# DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR INSERCIÓN

**PACS: 43.50 Rq**

de la Madrid Descalzo, Lorena[1]; Bravo Plana-Sala, José Mª [2]; Sánchez Perez, Juan Vicente[3] ; Ferri García, Marcelino[4]
[1]Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia-Camino de Vera s/n. 46022 Valencia
[3]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU
[4]Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, EPS Gandia
E-mail: lodela4@teleco.upv.es; jobrapla@fis.upv.es; jusanc@fis.upv.es

## ABSTRACT

Noise, especially traffic noise, appear according to a variety of studies like one of the most important current society worries. According to OCDR texts nine million of Spanish people put up with sounds levels up to sixty-five dB.
As a consequence, this program lie in working out as a tool to evaluate insertion losses in a source-barrier-receiver system, inside the program calculus are made according to the environmental characteristics. On the other hand, the program allows for introducing geographic information about relief, everything following the Normative ISO 9613 "*Attenuation of sound during propagation outdoors".*
To conclude, one of the purposes of this software is permit a specialized user, making proofs in the study system until the user achieve good result in sounds level according to normative and legislation.

## RESUMEN

El ruido, especialmente el provocado por el tráfico, figura según diversos estudios entre las mayores preocupaciones de la sociedad en la actualidad. A partir de datos de la OCDR se puede deducir que casi nueve millones de españoles soportan habitualmente niveles superiores a los sesenta y cinco decibelios.
Como consecuencia, en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta para la evaluación de las perdidas por inserción en un sistema fuente-barrera-receptor, en el que el cálculo de las atenuaciones se realiza teniendo en cuenta las características del medio. Por otro lado, permite la entrada de información de carácter geográfico atendiendo a la orografía del terreno, todo ello siguiendo las especificaciones de la Norma ISO 9613 "*Attenuation of sound during propagation outdoors".*
Una de las finalidades de la interfaz, es permitir a un usuario con conocimientos en la materia la realización de pruebas en el sistema, hasta alcanzar los objetivos y requisitos especificados tanto por la normativa como por la legislación vigente.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la sociedad vive rodeada de sonidos y ruidos en su día a día.
El sonido es un fenómeno físico que estimula el sentido del oído. Las vibraciones que producen los cuerpos materiales al ser golpeados o rozados se transmiten por un medio, donde se propagan en forma de ondas y al llegar a nuestros oídos, producen la sensación sonora[4].
Por otro lado, el ruido es la sensación auditiva no deseada correspondiente generalmente a una variación aleatoria de la presión acústica a lo largo del tiempo. Puede ser caracterizado por su espectro sonoro, es decir la relación entre la frecuencia de los sonidos puros que lo componen y la amplitud de la presión acústica correspondiente a cada una de esas frecuencias.

El término "contaminación acústica" hace referencia al ruido, cuando éste es considerado un contaminante, provocado por las actividades humanas (tráfico, industrias, locales de ocio, aviones, etc.), que produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de los seres vivos.[3] El ruido, es más o menos molesto y varía en función del tipo de fuente de la que proviene y puede ser debido al tráfico rodado, aéreo, de trenes, industrial o asociado a la vida comunitaria. Según estudios realizados por el instituto del ruido de Londres, la energía sonora total emitida a la atmósfera tiene su origen en el 80% por automóviles, con lo que se puede decir que las fuentes de ruido más importantes en los países industrializados son los automóviles, convirtiéndose el tráfico rodado en la fuente de contaminación acústica más importante de las grandes ciudades.
Según estudios de la Unión Europea (2005): “80 millones de personas están expuestas diariamente a niveles de ruido ambiental superiores a 65 dBA y otros 170 millones, lo están a niveles entre 55-65 dBA” , siendo 70 dBA el límite superior deseable según la Organización mundial de la salud(OMS). En consecuencia, la lucha contra el ruido es un tema que cada día preocupa más, es por ello que dar solución al problema está siendo un objetivo común en las últimas décadas.

En cuanto a las soluciones que se plantean, se dividen en tres vertientes atendiendo al punto en el cual se reduce el impacto del ruido: La fuente, el medio de propagación y el receptor. Siempre y cuando sea posible, se tratará de dar solución actuando sobre la fuente de ruido o sobre la propagación, reduciendo los niveles de emisión de la fuente y/o incorporando elementos en el medio de propagación que sean capaces de reducir los niveles que alcancen al receptor, como es el caso de las barreras acústicas. Por otro lado, las actuaciones sobre el receptor requieren de una mayor inversión económica y generalmente una molestia mayor, es por ello que se tratará de evitar salvo en casos estrictamente necesarios.
Este trabajo se presenta como herramienta para la evaluación de las perdidas por inserción en un sistema fuente-barrera-receptor. El cálculo de las atenuaciones se realiza atendiendo a las características del medio, por otro lado permite la entrada de información de carácter geográfico, atendiendo a la orografía del terreno, necesaria para el cálculo de distancias entre barrera y emisor-receptor, todo ello siguiendo las especificaciones de la Norma ISO 9613 “*Attenuation of sound during propagation outdoors” .*

## ATENUACIÓN PRODUCIDA POR OBSTÁCULOS

Para los cálculos de atenuación producidos por obstáculos en el sistema emisor-receptor, es imprescindible tener presente la normativa recogida en: “*ISO 9613 atenuación del sonido durante la propagación en exteriores”.*

A continuación se realiza un análisis del procedimiento que se ha de seguir para el estudio del efecto de la barrera en el sistema.
En primer lugar definir las pérdidas de inserción(IL) como la diferencia de niveles de presión sonora medidos en una misma posición del receptor antes y después de colocar la muestra del material de estudio dispuesta entre fuente y receptor.
En segundo lugar, la atenuación producida por una barrera, $A_{bar}$, viene dada por las pérdidas de inserción, y se debe distinguir entre:

| Difracción sobre el tope de la barrera y alrededor de los bordes verticales de una barrera | Difracción alrededor del borde vertical |
|---|---|
| $A_{bar} = Dz - A_{gr} > 0$ | $A_{bar} = Dz > 0$ |

**Tabla 1.** Tipos de atenuaciones producidas por una barrera. Dónde Dz representa la atenuación para cada banda de octava, la forma de cálculo viene recogida en la ecuación 1 y $A_{gr}$ Atenuación del suelo en ausencia de la barrera.

Para calcular la atenuación de la barrera Dz, se asume que existe solamente un camino significante de propagación de sonido desde la fuente sonora hasta el receptor. En el caso de que dicha presunción no sea valida, serían necesarios cálculos separados para otros caminos de propagación y se asume la contribución a partir de varios caminos a la presión sonora al cuadrado en el receptor.

La atenuación de la barrera Dz, en decibelios, debe ser calculada para este camino según la ecuación (1):

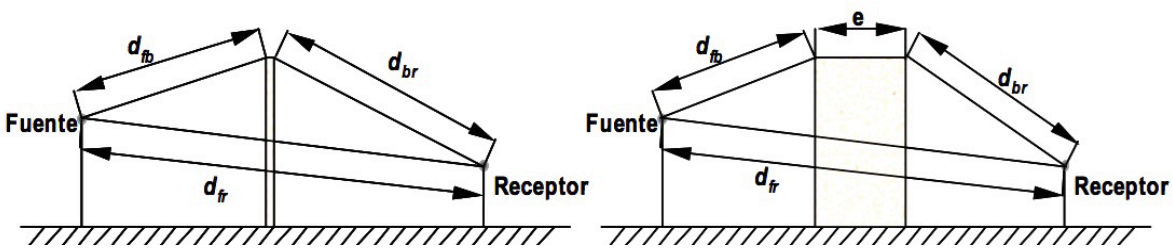



**Fig 1.** Sistema de estudio fuente-receptor, parámetros necesarios para el cálculo.

$$D_Z = 10 \log\left(3 + \frac{C2}{\lambda} C3\ Z\ Kmet\right)$$

$$C2 = \begin{cases} 20, \text{incluye el efecto de reflexiones del suelo.} \\ 40, \text{se toman en cuenta casos especiales de reflexiones del suelo.} \end{cases}$$

$$C3 = \begin{cases} 1, & \text{Difracción simple} \rightarrow \text{Pantallas delgadas} \\ \left[1 + \frac{\left(\frac{5\lambda}{e^2}\right)}{\left(\frac{1}{3} + \frac{5\lambda}{e^2}\right)}\right], & \text{Difracción doble} \rightarrow \text{Pantallas de espesor e} \end{cases}$$

z es la diferencia de camino entre el sonido directo y difractado, calculado por la ecuación:

$$z = [(d_{fb} + d_{br} + e)^2 + a^2]^{1/2} - d_{fr}$$

ddnde $d_{fb}$ es la distancia desde la fuente al primer borde de difracción, $d_{br}$ es la distancia entre el segundo borde de difracción y el receptor.

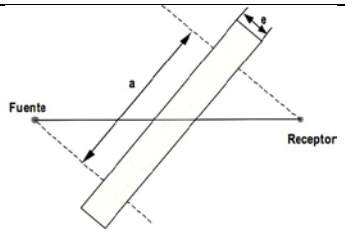



**Fig 2.** El parámetro "a" corresponde a la distancia de las proyecciones normales entre la fuente y el receptor (m) sobre la barrera.

Kmet es el factor de corrección para condiciones meteorológicas:

$$kmet = \begin{cases} 1, Z \leq 0 \\ e^{\left[\frac{1}{2000}\sqrt{\frac{dfbdfrdbr}{2Z}}\right]}, Z > 0 \end{cases}$$

**Tabla 2.** Método de cálculo recogido de la Norma ISO 9613 "Attenuation of sound during propagation outdoors" , utilizado en el software diseñado.

Una de las consideraciones del método es el hecho de que la atenuación por la barrera Dz en cualquier banda, no debe ser tomada como mayor de 20 dB en el caso de una sola difracción (barreras delgadas) y 25 dB en el caso de doble difracción (barreras gruesas).

## ENTORNO DE DESARROLLO

### Matlab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, el cual recibe el nombre de lenguaje m(*.m*).
Se encuentra disponible para las plataformas de Unix, Windows y Apple.Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes. Además, mediante diferentes toolbox, permite ampliar sus capacidades.

### Guide

GUI(Interfaz Gráfica de Usuario), es un entorno de trabajo diseñado para la programación visual , diseñado para elaborar y ejecutar programas en los cuales es necesario ingresar parámetros de entrada. Es una herramienta de trabajo, planificada para crear interfaces gráficas para el usuario de una manera fácil y rápida.

## DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica diseñada consta de una ventana principal y dos ventanas adicionales mediante las cuales se realiza un estudio del sistema fuente-barrera-receptor, ateniendo a las características de los elementos del sistema así como de la orografía del terreno.
A continuación, se procede a la descripción de cada una de las ventanas que dan forma al software diseñado:

### Ventana principal

En la ventana principal la cual tiene un aspecto como el de la figura 3 se pueden introducir los parámetros de entrada necesarios para los cálculos, visualizar resultados mediante gráficas, obtener resultados numéricos de niveles globales de presión en ponderación A, así como acceder al resto de ventanas del programa.

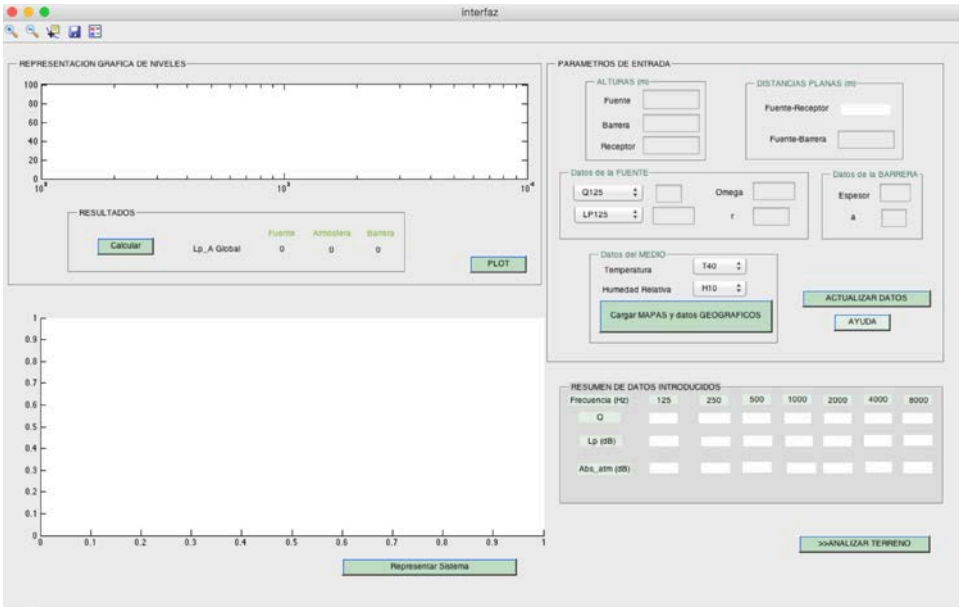



**Fig 3.** Ventana principal del programa

### Ventana cargar Mapas y datos Geográficos

El sistema de estudio, no se encuentra en un sistema plano, sino sobre un terreno cuya orografía determina las alturas reales de cada uno de los elementos del sistema, así pues, es importante conocer el terreno. Para ello se abre una nueva ventana a través del botón *cargar MAPAS Y datos GEOGRÁFICOS* la cual presenta el aspecto de la figura 4 :

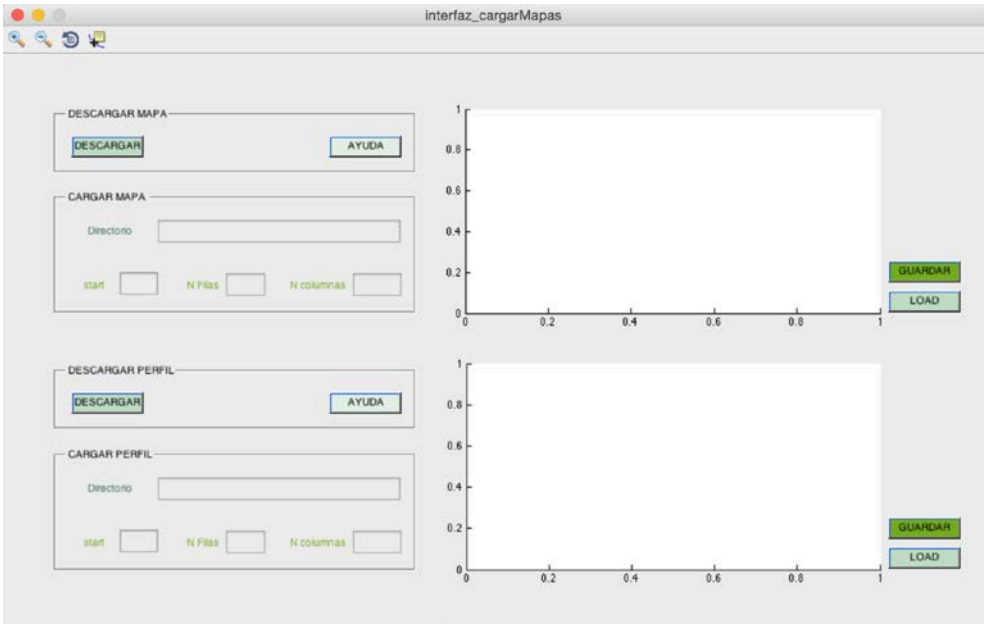



**Fig 4.** Ventana para cargar mapas y perfil del terreno.

En esta ventana, se pueden realizar 3 acciones:

1. Descargar los mapas y el perfil del terreno:

Para la **descarga de los mapas**, se hace uso de la página del Instituto Geográfico Nacional (http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do) la cual se abrirá en el browser propio de Matlab.
Para la **descarga del perfil del terreno** se hace uso de una plataforma online gratuita, a la cual se puede acceder a través *del botón descargar del panel DESCARGAR PERFIL*: (http://www.geocontext.org/publ/2010/04/profiler/en)

2. Cargar el mapa y el perfil del terreno**:**

Una vez se dispone del mapa y del perfil del terreno el siguiente paso consiste en cargarlos en el programa, para ello es importante abrir los documentos en formato .txt, y asegurarse de localizar cada uno de los elementos necesarios para cargarlos.

3. Guardar gráficas de resultados:

Por último, si se desean guardar las gráficas de las curvas de nivel del mapa y/o del perfil del terreno la **ventana de la interfaz cargar mapas y perfil del terreno** cuenta con un *botón de GUARDAR*.

**Ventana resultados**

Dada la importancia del terreno en el estudio, el programa cuenta con una ventana dedicada exclusivamente a su análisis. La manera de acceder a la ventana de análisis del terreno es mediante el *botón >>Analizar terreno*

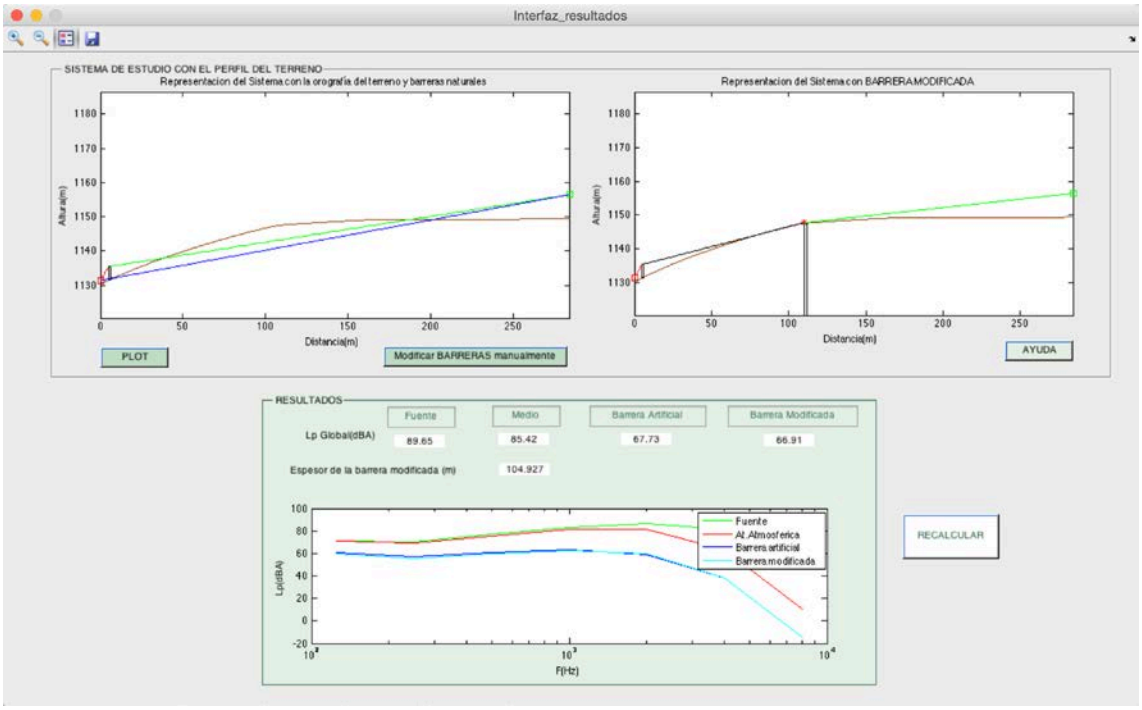



**Fig 5.** Ventana para el análisis del terreno y resultados finales.

En la figura 5 se observan los diferentes paneles para analizar el terreno una vez se ha ejecutado el programa y analizado el terreno.Por un lado se tiene el *panel Sistema de estudio con el perfil del terreno,* en el cual mediante el *botón PLOT* se representa el mismo sistema de la ventana principal con la particularidad de la herramienta *ginput*[1]*(n)* de Matlab, que permite determinar que obstáculo natural del perfil del terreno puede producir difracción accionando el *botón Modificar BARRERA manualmente,* así pues, tan solo con un *click* en el punto correspondiente se almacenará dicha coordenada, para su posterior análisis siguiendo la normativa ISO 9613-2.
Este análisis, se realiza en la siguiente gráfica del mismo panel, en la cual aparecerá el nuevo sistema con la incorporación del espesor debido a los obstáculos del terreno a la barrera originaria.

Por último, en el *panel RESULTADOS* se pretende incorporar las nuevas características de la barrera al modificarla por la aparición de elementos de obstrucción en el terreno. Para ello, se cuenta con una recogida de resultados en la parte superior del panel, en los cuales se replican los datos de la ventana principal con la finalidad de que el usuario no tenga que volver atrás y poder tener la totalidad de los datos en la última ventana, además de los datos anteriores, se incorpora la contribución de la barrera modificada, obteniendo así el nivel global en dBA de presión sonora definitivo en el receptor, con este resultado el usuario deberá consultar la legislación vigente del lugar donde se encuentre el sistema para poder determinar si se encuentran dentro de los límites o si por el contrario supera los niveles recomendados, en cuyo caso se debería retomar la ventana principal y realizar las modificaciones pertinentes para alcanzar los niveles correctos.
Para poder no solo, obtener resultados de niveles globales en el receptor, sino de observar cómo según si se trata de frecuencias altas o bajas el nivel de presión sonora varía, el panel cuenta con una gráfica para su representación, como sucedía en la ventana principal. Todo lo descrito se logra mediante el *botón RECALCULAR.*

[1] ginput(n), permite guardar en un vector n puntos mediante un cursor que aparecerá en el axes actual y el usuario accionará en aquellos puntos de interés de la gráfica.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un software que consiste en una interfaz gráfica diseñada mediante la herramienta Guide de Matlab cuyo objetivo es la evaluación de las perdidas por inserción en un sistema fuente-barrera-receptor. El cálculo de las atenuaciones se realiza atendiendo a características del medio como son temperatura y humedad, por otro lado el software permite la doble entrada de información geográfica, para un análisis completo del sistema de estudio.
Atendiendo a la orografía del terreno, se presenta una interfaz sencilla e intuitiva que permite el cálculo de las pérdidas de inserción atendiendo a la Norma ISO 9613 "*Attenuation of sound during propagation outdoors"* . El sistema tiene en cuenta la situación del relieve entre emisor y receptor, de forma que el usuario puede visualizar la posición de la barrera y permite el cálculo de distancias entre barrera y emisor-receptor.

## PROPUESTAS FUTURAS

Es importante destacar el carácter abierto que presenta el software diseñado, permitiendo ampliaciones futuras tanto a nivel de usuario como de programador.
La finalidad de no dejar perfectamente cerrada la programación es permitir en un futuro, no necesariamente lejano, la ampliación de diferentes aspectos de la plataforma como son:

- Considerar otros tipos de fuentes y ampliar el estudio de las fuentes puntuales.
- Mayor flexibilidad en el tipo de barrera incorporando la selección del tipo de material utilizado en la construcción de la misma.
- Generar documento en formato *.pdf* que sirva de informe del estudio realizado por la plataforma.
- Ampliar el tipo de formato de los mapas de entrada.

## REFERENCIAS

[1] Bartí, Robert . *Acústica medioambiental volumen 1 y 2*
[2] de la Madrid Descalzo, Lorena**,** "Interfaz gráfica para la evaluación del ruido ambiental y medidas correctoras" Trabajo Final de Grado, ETSIT-UPV,2015
[3] https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminación_acústica
[4] http://conceptodefinicion.de/sonido/
[5] ISO. ISO 9613-1, *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1996*
[6] ISO 9613-2, *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors —part 2: General method of calculation, 1996*
[7] MAEKAWA Z.,(*1968) Noise reduction by screens*, Applied Acoustics, *1.157-173*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CÁLCULO DEL NIVEL MÁXIMO DE INMISIÓN PROVOCADO POR EL RUIDO FERROVIARIO

PACS: 43.50.Lj

Giménez Anaya, Isabel; López Santos, Fernando; Carretero de la Rocha, David
SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L.
Avda. San Francisco Javier, nº 9, Edif. Sevilla 2, Planta. 5ª, Mód. 27-28
41018 SEVILLA. España
Tel: 954510031, Fax: 954250684
E-Mail: isabel@sincosur.es, flopez@sincosur.es, dcarretero@sincosur.es

## ABSTRACT

One of the requirements established by the Spanish law in matters of noise pollution for the new railway infrastructures is that the maximum level of inmission cannot exceed the limit values. However, it is impossible to obtain it from acoustic measurements if the infrastructure does not yet exist, and it is necessary to obtain this index using predictive calculations. In this case, the common method to calculate railway noise defined by the Directive 2002/49/CE, does not determine the value of $L_{max}$. This paper lays out different calculation methods to determine the maximum level of inmission of railway noise using predictive models.

## RESUMEN

Uno de los requisitos establecidos en el Real Decreto 1367/2007 para nuevas infraestructuras ferroviarias es que el nivel máximo de inmisión ($L_{max}$) no supere los valores límite. Sin embargo, es imposible obtenerlo a partir de medidas acústicas si la infraestructura es inexistente, siendo necesaria la obtención de este índice mediante cálculos predictivos. En esta línea, el método común de cálculo de ruido ferroviario definido por la Directiva 2002/49/CE, no define el cálculo de $L_{max}$. En esta comunicación se plantean diferentes métodos de cálculo para determinar el nivel máximo de inmisión de ruido ferroviario a partir de modelos predictivos.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas del método de cálculo del ruido ferroviario recomendado por la Directiva 2002/49/CE y usado en el Estado Español, SRM II, es que sólo calcula valores medios de los índices de ruido y por tanto, el indicador $L_{max}$ no puede estimarse.

Este indicador debe ser calculado con el fin de dar cumplimiento a los valores límite de inmisión de ruido aplicables a nuevas infraestructuras ferroviarias establecidos en el Real Decreto 1367/2007.
A continuación se van a exponer diferentes metodologías, basadas en la experiencia adquirida por Sincosur Ingeniería sostenible S.L. en trabajos similares, para el cálculo del nivel máximo de inmisión de ruido de una línea de alta velocidad a partir de modelos predictivos.

## 2.- METODOLOGÍA

### 2.1.- Modelo SRM-II

El método de cálculo nacional de los Países Bajos, publicado en "Reken – en meetvoorschrift railverkeerslawaii '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 de noviembre de 1996", es el método recomendado por la Comisión Europea para la adopción por parte de los Estados miembros que no cuenten con métodos de cálculo nacionales o deseen cambiarlo para la determinación de los indicadores comunes $L_{den}$, $L_{dia}$, $L_{tarde}$ y $L_{noche}$ para el ruido de tráfico ferroviario, para la aplicación de la Directiva Europea 2002/49/CE.

El modelo holandés SRM II describe con precisión la relación entre el nivel de ruido y el ruido de la fuente. El cálculo se realiza en bandas de octava y considera diferentes alturas de la fuente, lo que hace predecir el efecto de las posibles barreras de ruido. La ecuación de emisión usada en el modelo es:

$$E_c = a_c + b_c \log V_c + 10 \log Q_c + K_{tr'}$$

donde:

- $a_c, b_c$ son los factores de emisión para las categorías de trenes c.
- $V_c$ es la velocidad media al paso de los vehículos.
- $Q_c$ es la media de las unidades de las categorías de vehículos.
- $K_{tr'}$ es una corrección por discontinuidades de la vía y por la rugosidad de los raíles

Para poder estimar el valor de $L_{max}$ ha sido necesario determinar una hipótesis sobre bajo qué condiciones se obtendría la mayor emisión sonora. Para ello, se ha determinado un escenario hipotético en el que existe una circulación ininterrumpida de trenes a lo largo de una hora, obteniendo el nivel equivalente que coincidiría con el nivel máximo. Este escenario sería el equivalente al de un tren de un número infinito de coches circulando durante una hora a lo largo de la vía.

Este escenario ha sido posible plantearlo conociendo la velocidad de circulación en el tramo y la longitud de cada tren (200 metros). De esta forma se ha podido determinar el número máximo de trenes que podrían circular de forma contigua en una hora, a partir del tiempo que tarda en pasar cada tren por cada tramo.

**2.2.- Método de estimación del ruido ferroviario. Guide du Bruit des Transports Terrestres (GBTT)**

Surge como simplificación a modelos numéricos complejos y como una herramienta para una primera aproximación cuya finalidad es permitir a un planificador o promotor tener en cuenta el ruido de tráfico ferroviario en sus estudios.

Este método de cálculo es sólo una manera simplificada usada para el estudio y la predicción de ruido de los ferrocarriles. Se basa en simplificaciones que limitan el campo de uso ya que no tiene en cuenta, por ejemplo, el efecto de la topografía.

El método distingue tres etapas para el cálculo del ruido ferroviario:

1. Determinación del nivel sonoro máximo de un tren en campo libre, en función de la distancia del receptor a la vía, de la velocidad y del tipo de tren.

$$L_{max} = L_0 - K\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 30\log\left(\frac{V}{V_0}\right) - K_d \ \ (dB(A))$$

donde:

- $L_0$: Nivel sonoro de referencia emitido por un tren determinado, circulando a velocidad $V_0$, percibido por un receptor situado a una distancia $d_0$, a la altura normalizada $h_0$. Estos valores se encuentran tabulados para cada tipo de tren considerado.
- $K$: Coeficiente multiplicador de la función de la distancia. Depende de la longitud del tren y se encuentra tabulado para cada uno de los tipos considerados en la metodología.
- $d$: Distancia entre el receptor y el eje de la vía férrea, en metros.
- $V$: Velocidad del tren en km/h.
- $V_0$: Velocidad del tren de referencia que emite un nivel $L_0$ a una distancia $d_0$.
- $K_d$: Corrección de directividad, es decir, tiene en cuenta el ángulo bajo el que el receptor percibe el sonido. Es un valor tabulado.

2. Cálculo del nivel equivalente ($L_{eq}$) de un tren en función del nivel máximo y del tiempo de exposición del receptor al paso del tren:

$$L_{eq-1} = L_{max} + 10\log\left(\frac{t_e}{T}\right) \ (dB(A))$$

donde:

- $L_{max}$: Nivel sonoro máximo provocado por un tren percibido por un receptor situado en campo abierto.
- $t_e$: Tiempo de exposición durante el cual se percibe un sonido al menos igual al nivel máximo menos 10 dB(A).

3. Cálculo de $L_{eq}$ de un conjunto de trenes que circulan durante un periodo de tiempo T.

$$L_{eq} = L_{eq-1} + 10\log n \ \ (dB(A))$$

donde:

- $L_{eq-1}$: Nivel sonoro emitido por un tren.
- $n$: Número total de trenes que circulan en ambas direcciones.

### 2.3.- Método combinado Guide du Bruit – SRM II

Teniendo en cuenta las limitaciones de la metodología expuesta en el apartado 2.2´:

- circulaciones en campo libre,
- no tiene en cuenta el efecto de la topografía,
- validez de las ecuaciones para receptores situados a menos de 250 metros de la vía,
- velocidades de la vía comprendidas entre 40 y 200 km/h

Y por otro lado, el modelo recomendado por la legislación básica estatal en materia de contaminación acústica para la realización de los mapas de ruido de infraestructuras ferroviarias (apartado 2.1).

Se ha llevado a cabo un nuevo cálculo del nivel máximo de inmisión teniendo en cuenta las ecuaciones del modelo Guide du Bruit des Transports Terrestres y los niveles de ruido para los periodos día, tarde y noche calculados por el método SRM II. Las ecuaciones que rigen el nuevo modelo son:

$$L_{max} = L_{eq,T(SRM\ II)} - 10 \cdot \log\left(\frac{1}{V} + 6 * \frac{6d}{100}\right) + 10 \cdot \log T - 10 \cdot \log n_i$$

donde:

- $L_{eq,T(SRM\ II)}$ = nivel continuo equivalente obtenido a partir del modelo SRM II.
- $V$ = Velocidad del tren en metros por segundo.
- $d$ = distancia vía - receptor.
- $T$ = período horario en segundos.
- $n_i$ = número de trenes de cada tipo que circulan en el período T

### 2.4.- Método Pass-by Levels de CadnaA

La última metodología mostrada es el uso de la herramienta Pass – by Levels que posee el software de simulación acústica CadnaA. Éste permite calcular, de acuerdo con la norma seleccionada (en el caso que nos ocupa el método SRM II), la evolución temporal del nivel de presión sonora de un solo vehículo u otra fuente con una emisión específica viajando a lo largo de la infraestructura ferroviaria.

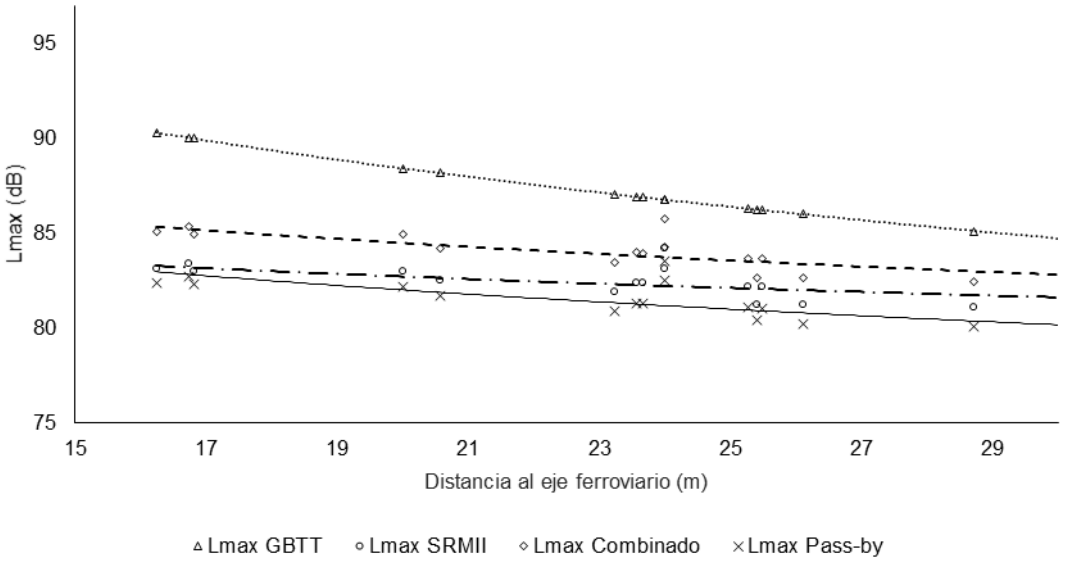
Esta emisión específica se obtiene a partir de las tipologías de trenes definidas en el modelo SRM II.

## 3.- RESULTADOS OBTENIDOS

Las cuatro metodologías descritas en el apartado anterior han sido calculadas para diferentes receptores situados a distancias variables de la infraestructura ferroviaria y con velocidades dos tipos de velocidades de paso del tren de Alta Velocidad (AVE).

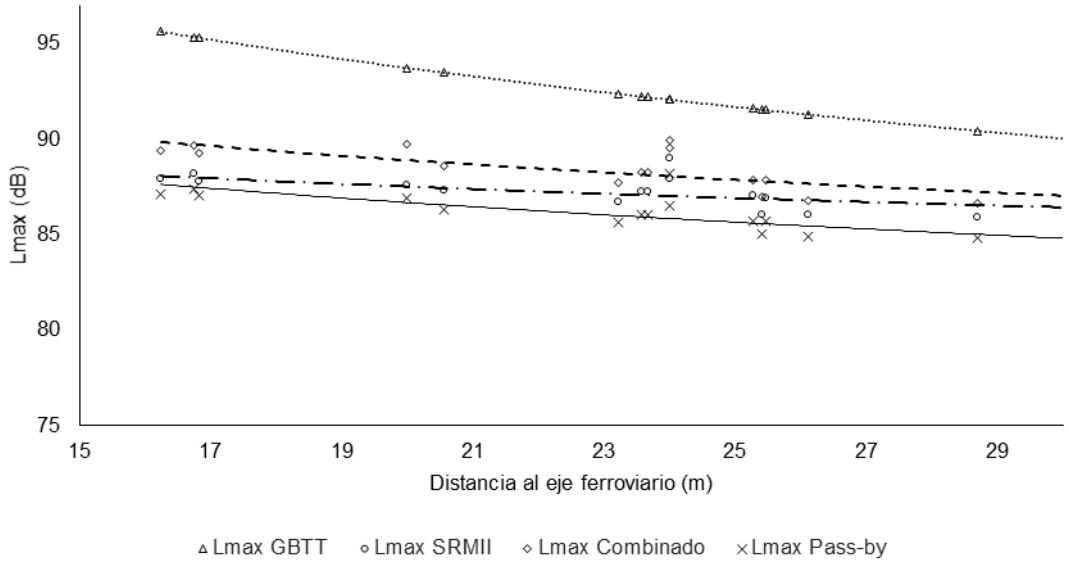
A continuación se muestran los resultados obtenidos del índice $L_{max}$ para la velocidad de paso del AVE de 200 km/h:

| Receptor | Distancia (m) | Velocidad de vía = 200 km/h | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | GBTT | SRM II | Combinado | Pass- by Levels |
| 1 | 24 | 86,8 | 83,1 | 84,3 | 82,5 |
| 2 | 25,27 | 86,3 | 82,2 | 83,7 | 81,1 |
| 3 | 23,66 | 86,9 | 82,4 | 84,0 | 81,3 |
| 4 | 23,57 | 86,9 | 82,4 | 84,0 | 81,3 |
| 5 | 23,22 | 87,1 | 81,9 | 83,5 | 80,9 |
| 6 | 54,63 | 79,3 | 80,6 | 80,8 | 77,3 |
| 7 | 20,56 | 88,2 | 82,5 | 84,2 | 81,7 |
| 8 | 28,7 | 85,1 | 81,1 | 82,4 | 80,1 |
| 9 | 25,47 | 86,2 | 82,2 | 83,7 | 81,0 |
| 10 | 26,11 | 86,0 | 81,2 | 82,6 | 80,2 |
| 11 | 25,4 | 86,2 | 81,2 | 82,7 | 80,4 |
| 12 | 16,74 | 90,0 | 83,4 | 85,3 | 82,7 |
| 13 | 16,24 | 90,3 | 83,1 | 85,1 | 82,4 |
| 14 | 16,82 | 90,0 | 83,0 | 84,9 | 82,3 |
| 15 | 24 | 86,8 | 84,2 | 85,8 | 83,5 |
| 16 | 31 | 84,4 | 80,3 | 81,5 | 79,2 |
| 17 | 20 | 88,4 | 82,8 | 85,0 | 82,2 |




A continuación se muestran los resultados obtenidos del índice $L_{max}$ para la velocidad de paso del AVE de 300 km/h:

| Receptor | Distancia (m) | Velocidad de vía = 300 km/h | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | GBTT | SRM II | Combinado | Pass- by Levels |
| 1 | 24 | 92,0 | 87,9 | 89,5 | 86,5 |
| 2 | 25,27 | 91,6 | 87,0 | 87,8 | 85,7 |
| 3 | 23,66 | 92,2 | 87,2 | 88,3 | 86,0 |
| 4 | 23,57 | 92,2 | 87,2 | 88,3 | 86,0 |
| 5 | 23,22 | 92,3 | 86,7 | 87,7 | 85,6 |
| 6 | 54,63 | 84,5 | 85,4 | 84,6 | 81,9 |
| 7 | 20,56 | 93,5 | 87,3 | 88,6 | 86,3 |
| 8 | 28,7 | 90,4 | 85,9 | 86,6 | 84,8 |
| 9 | 25,47 | 91,5 | 86,9 | 87,8 | 85,7 |
| 10 | 26,11 | 91,3 | 86,0 | 86,8 | 84,9 |
| 11 | 25,4 | 91,5 | 86,0 | 86,9 | 85,0 |
| 12 | 16,74 | 95,3 | 88,2 | 89,7 | 87,4 |
| 13 | 16,24 | 95,6 | 87,9 | 89,4 | 87,1 |
| 14 | 16,82 | 95,3 | 87,8 | 89,2 | 87,0 |
| 15 | 24 | 92,0 | 89,0 | 89,9 | 88,2 |
| 16 | 31 | 89,7 | 85,1 | 85,7 | 83,9 |
| 17 | 20 | 93,7 | 87,6 | 89,7 | 86,9 |




## 4.- CONCLUSIONES

El método de la Guide du Bruit des Transports Terrestres es el que mayor niveles de $L_{max}$ calcula y la diferencia aún es mayor a velocidades de 300 km/h. Esto es debido a las limitaciones y acotaciones del propio método (válido para velocidades no superiores a 200 km/h, no tiene en cuenta la topografía y las circulaciones en campo libre).

El método Pass – by Levels del software CadnaA es el que menores niveles de $L_{max}$ calcula.

A distancias pequeñas entre el receptor y la vía los valores calculados con los métodos SRM II y Pass – by Levels son muy semejantes; las diferencias entre los valores calculados se hacen mayores a medida que se aumenta la distancia entre el receptor y la fuente de ruido.

El caso contrario ocurre entre los métodos Combinado y SRM II, las diferencias de niveles máximos de inmisión son mayores a distancias menores; y estas diferencias se ven reducidas a medida que aumenta la distancia del receptor a la línea de alta velocidad.

Para distancias cortas entre el receptor y la línea de Alta Velocidad, las variaciones que se pueden producir entre los valores del nivel máximo de inmisión calculados con los diferentes modelos pueden oscilar en 8 dB; en distancias mayores esta oscilación se reduce hasta los 2 dB.

Para una primera aproximación y cuando se quiera encontrar el caso más desfavorable posible el método propuesto por la Guide du Bruit des Transports Terrestres es el más conservador y que menos coste posee, ya que no se tiene la necesidad de generar un modelo tridimensional ni el uso de un software de simulación acústica.

Pero la realidad es otra, tenemos herramientas de cálculo muy potentes, que recrean el escenario de simulación casi a la perfección y que poseen los métodos de cálculo establecidos por la legislación.

Además, las inversiones que hay que realizar para la implementación de las protecciones acústicas son elevadas y es importante estudiar la viabilidad de su implantación. Habrá que tener en cuenta ciertos criterios para el diseño de las mismas: la capacidad de aislamiento

acústico a ruido aéreo, el carácter absorbente o reflectante de la pantalla, el dimensionamiento geométrico (altura, longitud y forma) y la ubicación, son parámetros que incluyen directamente en la eficacia de las pantallas acústicas. El contar con herramientas de simulación acústica nos permite implementar las actuaciones correctoras de forma virtual, obtener la eficacia de la misma (reducción de personas afectadas con la implementación de la medida) y por supuesto la eficiencia de la actuación.

## 5.- BIBLIOGRAFÍA

[1] *Proyecto de Construcción de Protección Acústica de la Línea de Alta Velocidad Antequera - Málaga*. SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L.

[2] *Guide du Bruit des Transports Terrestres. Prévision des niveaux sonores*. Ministère de l'environnemet et du cadre de vie; Ministère des transports (1980).

[3] *Método de Cálculo nacional de Los Países Bajos,* publicado en *"Reken – En Meetvoorschrift Railverkeerslawaii '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening En Milieubeheer", 1996*

[4] M. Reiter; B.Kostek. *Comparing railway noise prediction results for passenger trains using various models. EURONOISE 2008,* Paris, pp. 2637 – 2642.

[5] Małgorzata Szwarc, Bożena Kostek, Józef Kotus, Maciej Szczodrak, Andrzej Czyżewski. *Problems of Railway Noise—A Case Study.* International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2011, Vol.17. Nº3, pp. 309 – 325.

[6] L. Faus; J.Romero; A. Jiménez, A.Marín, A. Sanchís, S. Cerdá. *Un primer estudio del ruido en los actuales trenes de la red ferroviaria española.* Revista de acústica. Vol. 34. Nº 1 y 2, pp. 5 – 17.

[7] *Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental*. «DOUE» núm. 189, de 18 de julio de 2002, páginas 12 a 25.

[8] *Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido*. «BOE» núm. 276, de 18 de noviembre de 2003, pp. 40494 - 40505.

[9] *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.* «BOE» núm. 254, de 23 de octubre de 2007, pp. 42952 - 42973.

[10] DataKustik. Reference Manual CadnaA, release 4.3. 2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN ENTRE URBANISMO Y RUIDO DE TRÁFICO

PACS: 43.50.Rq

Barrigón Morillas, Juan Miguel[1]; Rey Gozalo, Guillermo[2]; Trujillo Carmona, J[3]; Montes González, David[1]; Atanasio Moraga, Pedro[1]; Vílchez-Gómez, Rosendo[1]; Gómez Escobar, Valentín[1]; Méndez Sierra, Juan A.[1]; Prieto-Gajardo, Carlos[1]

[1] Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España
Tel: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03
E-mail: barrigon@unex.es

[2] Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Chile
5 Poniente 1670, 3460000 Talca, Región del Maule, Chile;
E-mail: greyg@uautonoma.cl

[3] Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Extremadura
Avda. Elvas s/n, Badajoz, 06071, España
E-mail: trujillo@unex.es

## ABSTRACT

Nowadays, road traffic is the main source of urban noise. Noise maps can be considered as an essential tool to assess the impact of this source and to propose action plans to improve the harmful situations for people. The standard methodology for carrying out noise maps involves the use of a grid to define the evaluation points, either by calculation using propagation models, either by measurements. The ability of the application of urban variables to predict noise levels in any street has been studied in this paper.

## RESUMEN

El tráfico es la fuente de ruido urbano de mayor importancia en la actualidad. Los mapas de ruido pueden considerarse como una herramienta fundamental para evaluar el impacto de esta fuente y proponer planes de acción para mejorar las situaciones perjudiciales para las personas. La metodología normalizada para la realización de mapas de ruido implica el uso de una retícula para definir los puntos de evaluación, sea mediante cálculos, empleando modelos de propagación, bien mediante medidas. En este trabajo estudiamos la capacidad que el empleo de variables urbanísticas tiene para predecir el nivel sonoro que existirá en una calle cualquiera.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbanístico que se ha ido produciendo a escala mundial en las últimas décadas ha supuesto un aumento del número y utilización de las infraestructuras de transporte. Esto a su vez ha supuesto un aumento progresivo de los niveles de ruido asociados, en su mayoría, a la fuente de ruido del tráfico rodado [1]. Recientes publicaciones por la Organización Mundial de la Salud indican que la contaminación acústica ocupa el segundo lugar entre los distintos contaminantes ambientales por su impacto sobre la salud pública en ciudades europeas [2].

Un primer paso en la búsqueda de posibles soluciones es el conocimiento de la situación acústica y en este sentido, una herramienta utilizada por diferentes investigadores y recogida en la Directiva Europea de Ruido son los mapas de ruido [3]. Para la realización de los mismos existen diferentes metodologías normalizadas basadas en medidas “in situ” [4] o métodos de cálculo [3]. Sin embargo, la estrategia más utilizada son los métodos de cálculo, que ya están incorporados en diferentes softwares de predicción sonora.

Los métodos de cálculo se basan principalmente en dos tipos de variables: variables asociadas a la fuente sonora (número de vehículos, velocidad media, tipo de vehículos…) y variables asociadas a las características del entorno (altura del terreno, presencia de obstáculos, tipo de pavimentos…).

El tráfico rodado es una variable temporal y espacial, es decir, que va a depender del momento del día y del lugar donde se lleve a cabo la medición. Por lo tanto, para conseguir valores precisos necesitamos realizar mediciones de larga duración y en distintos puntos. Ello conlleva dos posibles inconvenientes: el primero de ellos, es que no disponemos de estaciones continuas de conteo de vehículos en distintos tipos de calles y, el segundo de ellos, que este primer inconveniente, es solucionado con medidas “in situ” cuya duración es medición es limitada y cuyos resultados depende de la estrategia utilizada por el técnico. Estas variables asociadas a la fuente sonora, según diferentes autores [5,6], son las que explican la mayor variabilidad de los niveles sonoros.

Con respecto al entorno urbano, generalmente son variables sólo espaciales, que con el desarrollo de los sistemas de información geográfica, podemos obtenerlas de una manera relativamente fácil en las diferentes administraciones. También, el desarrollo de diferentes visores tridimensionales, por ejemplo los desarrollados por Google, nos pueden aportar gran parte de esta información.

En resumen, las variables urbanísticas son relativamente fáciles de obtener en comparación con las variables asociadas al tráfico rodado y quizás un estudio exhaustivo de las mismas, nos ayude a explicar de manera significativa la variabilidad de los niveles sonoros presentes en las calles y ello nos pueda permitir obtener modelos de cálculo alternativos o utilizarlos conjuntamente con las variables del tráfico rodado para mejorar la precisión de los modelos actuales. Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio es el análisis de diferentes variables poblacionales y urbanísticas que nos permitan estimar un porcentaje significativo de la variabilidad de los niveles sonoros.

## METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó en la ciudad de Cáceres, la cual está localizada en la comunidad autónoma de Extremadura, al suroeste de España. La población es de aproximadamente de 95.000 habitantes aunque durante el periodo lectivo de los estudiantes de la Universidad de Extremadura, este número se ve incrementado en unos 10.000 habitantes. También algunas de las variables urbanísticas fueron analizadas en la ciudad de Talca, ciudad localizada en la VII Región de del Chile. La localización de ambas ciudades aparece en la Figura 1.




*Figura 1. Localización de las ciudades de Cáceres y Talca*

Un total de 135 variables urbanísticas fueron registradas en cada una de las calles donde se registró el nivel sonoro equivalente (periodo diurno de 7:00 – 23:00). Estas variables urbanísticas fueron clasificadas en los siguientes grupos:

1. Ubicación de la calle y demografía: latitud, longitud, población, distancia al centro de la ciudad…
2. Tipo de uso del suelo urbano: áreas industriales, áreas deportivas, áreas de recreo, áreas culturales, áreas educacionales, áreas religiosas, áreas administrativas, áreas sanitarias…
3. Geometría de la calle: longitud, anchura, altura media de los edificios, pendiente, tipo de pavimento…
4. Circulación y conectividad: número de semáforos, pasos de peatones, intersecciones, nodos de comunicación…
5. Transporte público y privado: buses urbanos, taxi, áreas de aparcamiento, gasolineras, puntos de recogida de residuos urbanos…

Una vez registradas las distintas variables urbanísticas, se analizó la relación que presentaban cada una de estas variables urbanísticas (variables independientes) con respecto al nivel sonoro equivalente registrado en el periodo diurno (variable dependiente). Para ello, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman. Se optó por esta prueba no paramétrica pues algunas variables no seguían una distribución normal o tomaban valores discretos.

Una vez realizada esta prueba, aquellas variables que presentaban una correlación significativa con los niveles sonoros, es decir que presentaban un p-valor inferior a 0,05, fueron seleccionadas para llevar a cabo un análisis de regresión múltiple. En este análisis de regresión múltiple se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC) para seleccionar aquellas variables independientes que contribuyen a mejorar significativamente la explicación de la variabilidad de la variable dependiente [7, 8]. Un elevado número de variables independientes pueden explicar mayor variabilidad de la variable dependiente pero con el inconveniente de construir un modelo complejo. Por esta razón, se utilizó el AIC y así, aplicar el principio de parsimonia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, tal y como se indicó anteriormente, se analizó la significación de la relación de las variables urbanísticas y el Leq(dBA). En la Tabla 1 se muestran aquellas variables urbanísticas que presentaban una correlación significativa (R), es decir, con un p-valor<0,05.

*Tabla 1 – Coeficientes de correlación de Spearman significativos obtenidos del análisis de la relación del Leq(dBA) con las distintas variables urbanísticas. (***) p-valor < 0,001; (**) p-valor < 0,01; (*) p-valor < 0,05.*

| Variables urbanísticas | R | Variables urbanísticas | R |
|---|---|---|---|
| [1] Población | 0,30(***) | [4] Conexión con carreteras nacionales | 0,39(***) |
| [2] Áreas deportivas | 0,18(*) | [4] Número de semáforos | 0,60(***) |
| [2] Áreas comerciales | 0,44(***) | [4] Semáforos por metros | 0,59(***) |
| [2] Áreas administrativas | 0,40(***) | [4] Semáforos por kilómetro | 0,59(***) |
| [2] Áreas de ocio | 0,38(***) | [4] Paso de peatones | 0,32(***) |
| [2] Áreas culturales | 0,24(**) | [4] Nodo de comunicación con estaciones de trenes | 0,17(*) |
| [2] Zonas verdes | 0,19(*) | [4] Entradas y salidas de nodos de comunicación | 0,17(*) |
| [2] Áreas educacionales | 0,46(***) | [4] Nodos de comunicación con plazas | 0,17(*) |
| [2] Áreas sanitarias | 0,26(***) | [4] Nodos de comunicación con estaciones de buses | 0,17(*) |
| [2] Áreas de alojamiento | 0,22(**) | [4] Cruces | 0,41(***) |
| [3] Longitud de la calle | 0,50(***) | [4] Cambios de sentido | 0,23(**) |
| [3] Anchura de la calle | 0,57(***) | [5] Paradas de bus | 0,49(***) |
| [3] Altura de los edificios | 0,20(*) | [5] Paradas de bus por kilómetro | 0,48(***) |
| [3] Número de carriles | 0,50(***) | [5] Marcas viales de paradas de bus | 0,53(***) |
| [3] Dirección de los carriles | 0,53(***) | [5] Paradas de taxi | 0,21(**) |
| [3] Longitud del parking | 0,17(*) | [5] Plazas de taxis | 0,21(**) |
| [3] Calles con perfil “U” | -0,23(**) | [5] Tipo de aparcamiento | 0,22(**) |
| [3] Calles con perfil mixto | 0,19(*) | [5] Área de aparcamiento | 0,23(**) |
| [3] Buen estado del pavimento | 0,32(***) | [5] Plazas de aparcamiento | 0,27(***) |
| [3] Regular estado del pavimento | -0,20(*) | [5] Gasolineras | 0,21(*) |
| [3] Mal estado del pavimento | -0,26(**) | [5] Nº de surtidores en las gasolineras | 0,21(*) |
| [3] Pavimento de asfalto | 0,30(***) | [5] Marcas viales de bus | 0,17(*) |
| [3] Pavimento de piedras | -0,20(*) | [5] Puntos verdes | 0,25(**) |
| [3] Pavimento de hormigón | -0,23(**) | [5] Puntos verdes por kilómetro | 0,17(*) |

En el grupo “ubicación de la calle y demografía”, la “población” es la única variable que presentaba una correlación significativa con respecto al Leq (dBA). Esta relación entre ambas variables ha sido estudiada en trabajos previos. Ha sido estudiada bien como densidad o como población total residente [9,10]. Aquellas calles que presentan mayor población residente generan una mayor movilidad de vehículos y con ello, es de suponer que presenten mayores niveles sonoros.

En el grupo “tipo de uso del suelo urbano”, las variables “áreas de ocio”, “áreas educacionales” y “áreas comerciales” presentan valores de R entre 0,38 y 0,46. Las normas internacionales indican la importancia de la zonificación acústica en la planificación urbana y por ende, este aspecto es recogido en las normativas nacionales, siendo indicados los niveles máximos

permitidos para cada tipo de uso de suelo urbano [3,11]. Los valores sonoros, además de tener en cuenta la sensibilidad de la población expuesta, tienen en cuenta las actividades que van a generar mayores niveles sonoros. Por lo tanto, el tipo de uso del suelo puede estar relacionado con los niveles sonoros presentes. Estas consideraciones han sido tenidas en cuenta por algunos autores. Así el tipo de lugar de ocio puede ser un buen predictor del nivel sonoro [12] y las vías que dan acceso a las zonas de interés (áreas comerciales, educacionales, de salud…) muestran niveles sonoros significativamente diferentes a otros tipos de vías [13, 14]

En el grupo de variables "Geometría de la calle" principalmente destacan las variables "longitud de la calle" y "anchura de la calle". La importancia de estas variables urbanísticas también ha sido identificada por otros autores [12, 15] en la mejora de la relación entre las variables asociadas a la fuente de tráfico rodado y el nivel sonoro equivalente. En estos estudios [15], el porcentaje de variabilidad explicada por las variables urbanísticas es muy bajo comparado con las variables asociadas a la fuente del tráfico rodado. Otras variables que presentan coeficientes de correlación elevados son las variables "número de carriles" y "dirección de los carriles", las cuales presentan un R superior a 0,50. Estas variables presentan una relación significativa con respecto a la "anchura de la calle".

En el grupo de variables "circulación y conectividad" aparecen variables que no habían sido mencionadas en trabajos anteriores y que se relacionan muy significativamente con el $L_{eq}$ (dBA). Entre ellas destaca el valor de R de las variables relacionadas con los "semáforos". Son las variables con mayor R. También destacar otras variables como "conexión con vías nacionales" y "cruces". La frecuencia de algunos de los dispositivos o marcas presentes en las vías urbanas para regular el tráfico están relacionados con la funcionalidad de las vías de comunicación y que en diferentes estudios han mostrado su relación significativa con los niveles sonoros [9, 13, 14].

Por último, el grupo de variables "Transporte público y privado", destacan las variables relacionadas con los autobuses urbanos. En algunas ciudades, el transporte público constituye una importante fuente de ruido [16]. Esto ocurre en las ciudades de Chile y en la Figura 2 se muestran resultados previos de un estudio que se está realizando en la ciudad de Talca (Chile).

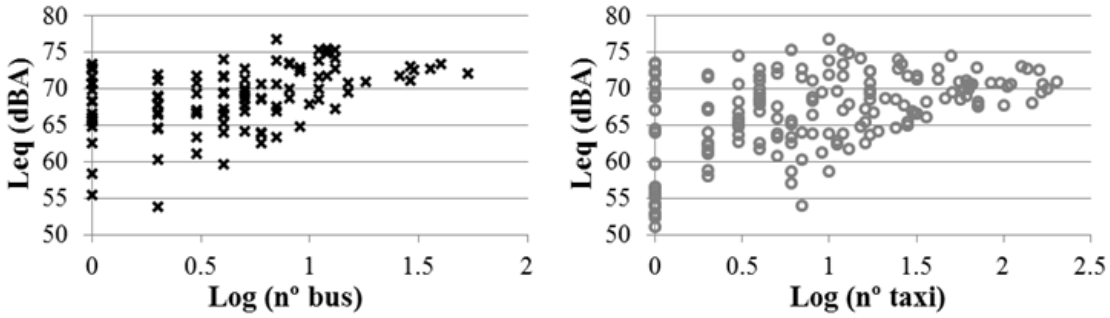



*Figura 2 – Relación entre las variables Leq(dBA) y el Log(nº buses urbanos) – Log(nº taxi)*

Los coeficientes de correlación (R) fueron de 0,40(***) para los autobuses urbanos y de 0,48(***) para los taxis. En nuestro estudio no se analizó el flujo de taxi and autobuses urbanos sino características urbanísticas relacionadas con estos transportes.

A continuación. Se realizó a cabo un análisis de regresión múltiple con todas las variables que se muestran en la Tabla 1. Los resultados de este modelo fueron:

- $R^2$ múltiple: 0,65
- $R^2$ ajustado: 0,52
- p-valor < 0,001
- AIC: 977,8

Efectivamente el $R^2$ múltiple es elevado pero el AIC también. Por ello, como se indicó en la sección anterior, las variables fueron incluidas paso a paso en el modelo de regresión múltiple. Con este tipo de análisis se obtuvieron dos modelos de regresión:

- Modelo 1: Leq ~ anchura de la calle + semáforos + buena condición del pavimento + áreas de ocio + marcas viales de parada de bus + áres comerciales
- Modelo 2: Leq ~ longitud de la calle + anchura de la calle + semáforos por metro + áreas de aparcamiento + buena condición del pavimento + áreas de aparcamiento + áreas de ocio

Ambos modelos presentan un mayor $R^2$ ajustado (coeficiente de determinación que tiene en cuenta el número de variables en el modelo) y un menor valor de AIC que el modelo de regresión que recoge todas las variables urbanísticas. Ambos modelos de regresión obtenidos presentan variables urbanas en común: anchura de la vía, semáforos, buena condición del pavimento y áreas de ocio. Anteriormente ya indicábamos que estas variables habían sido incluidas en modelos de regresión estimados por otros autores [12,15]. También estudios preliminares realizados en la ciudad de Talca (Chile) muestran cómo la variable urbanística "anchura de la vía" se relaciona significativamente con el Leq (R = 0,46***).

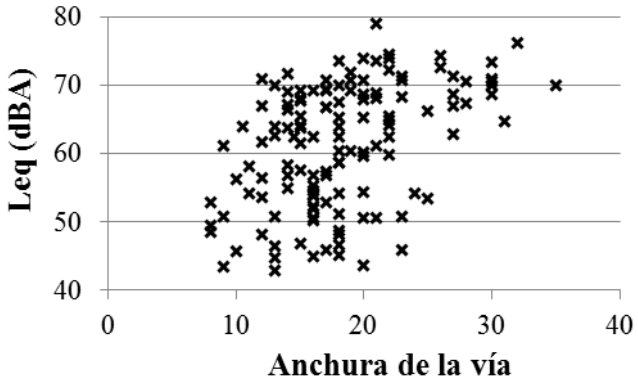



*Figura 3 – Relación entre Leq(dBA) y la anchura de la vía*

Sin embargo, ambos modelos de regresión presentan variables urbanísticas diferentes. Por ello, se analizó la varianza residual de ambos modelos (Tabla 2).

*Tabla 2 – ANOVA del Modelo 1 y Modelo 2*

| Modelo | Varianza residual | F test | P-valor |
|---|---|---|---|
| 1 | 3884,4 | | |
| 2 | 3627,7 | 10,3 | 0,002 |

En la Tabla 2 se muestra cómo el Modelo 2 presenta una varianza residual menor que el Modelo 1. Además la diferencia entre varianzas es estadísticamente significativa (p-valor<0,01**). Por lo tanto, fue seleccionado el Modelo 2:

$$L_{eq} = 47{,}9 + 7{,}97E\text{-}03 \text{ longitud de la calle} + 2{,}67E\text{-}01 \text{ anchura de la calle} + 363{,}6 \text{ semáforos por metro} + 1{,}92E\text{-}03 \text{ áreas de aparcamiento} + 2{,}89 \text{ buena condición del pavimento} - 1{,}62E\text{-}02 \text{ plazas de aparcamiento} + 5{,}73E\text{-}03 \text{ áreas de ocio}$$

A continuación, el modelo de regresión lineal múltiple fue validado a través de pruebas de normalidad (test de Shapiro-Wilk), homocedasticidad (test de Breusch-Pagan) y linealidad (test RESET). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3 – Pruebas para la validación del modelo de regresión lineal múltiple*

| Prueba | P-valor |
|---|---|
| Shapiro-Wilk | 0,22 |
| Breusch-Pagan | 0,05 |
| RESET | 0,14 |

En resumen, este trabajo previo nos muestran un modelo construido con un conjunto de variables urbanísticas que puede predecir muy significativamente el 57% de la variabilidad del Leq (dBA). Modelos construidos a partir de variables urbanísticas pueden ser muy importantes en la planificación urbana cuando no se disponen datos de flujo y composición de tráfico y de velocidad estimada.

## CONCLUSIONES

En este estudio previo realizado en la ciudad de Cáceres nos muestra como variables urbanísticas relacionadas con la “ubicación de la calle y demografía”, “tipo de uso del suelo”, “geometría de la calle” y “circulación y conectividad” presentan relaciones significativas con los niveles sonoros. Se tratan de variables que son fácilmente cuantificables y que cualquier entidad o persona no cualificada puede registrar.

Un total de 135 variables urbanísticas fueron registradas en distintas calles de Cáceres y de ellas, 48 presentaban correlaciones significativas con respecto al Leq (dBA). Un análisis de regresión múltiple fue llevado a cabo sobre estas 48 variables. El modelo seleccionado predice significativamente el 57% de la variabilidad del Leq (dBA). Este modelo incluye las variables urbanísticas: longitud de la calle, anchura de la calle, semáforos por metro, áreas de aparcamiento, buena condición del pavimento, plazas de aparcamiento y zonas de ocio. La importancia de algunas de estas variables no había sido detectada en modelos de predicción anteriores.

Los resultados de este estudio preliminar pueden ser importantes en modelos de planificación urbana bien como alternativa a los modelos que incluyen variables como el flujo del tráfico, composición del tráfico y velocidad de la vía (pues puede ser que no se disponga de esta información de forma precisa) o como complemento a los mismos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo, Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el Ministerio de Economía y Competitividad (TRA2012-37117) por la financiación del proyecto. También este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) a través del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) para investigadores de iniciación (Nº 11140043)



**BIBLIOGRAFÍA**

[1] EEA (European Environment Agency). Transport at a crossroads TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union. EEA Report 3, 2009.
[2] WHO (World Health Organization), Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, WHO, Geneva, 2011.
[3] COM. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (END). Official Journal L, 189. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union; 12–26, 2002.
[4] ISO 1996-2. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva: International Organization for Standardization; 2007.
[5] Steele C. A critical review of some traffic noise prediction models. Appl. Acoust., 62, 2001.
[6] Garg N and Maji S. A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. Environ. Impact Assess. Rev., 46, 2014.
[7] Bozdogan, H. Model selection and akaike's information criterion (aic): The general theory and its analytical extensions. Psychometrika, 52(3), 1987.
[8] Burnham KP, Anderson DR. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach (2nd ed.), Springer-Verlag, 2002.
[9] Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Rey Gozalo G, Vílchez-Gómez R. Possible relation of noise levels in streets to the population of the municipalities in which they are located. J. Acoust. Soc. Am., 128 (2), 2010.
[10] Salomons EM, Pont MB. Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. Landscape Urban Plan., 108, 2012.
[11] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, Boletín Oficial del Estado, España, 254, 2007.
[12] Ballesteros MJ, Fernández MD, Flindell I, Torija AJ, Ballesteros JA. Estimating leisure noise in Spanish cities. Appl. Acoust., 86, 2015.
[13] Rey Gozalo G, Barrigón Morillas JM, Prieto Gajardo C. Urban noise functional stratification for estimating average annual sound level. J. Acoust. Soc. of Am., 137 (6), 2015.
[14] Rey Gozalo G, Barrigón Morillas J M, Gómez Escobar V, Vílchez-Gómez R, Méndez Sierra JA, Carmona del Río FJ, Prieto Gajardo C. Study of the categorisation method using long-term measurements. Archives of Acoustics, 38(3), 397-405, 2013.
[15] Torija AJ, Genaro N, Ruiz DP, Ramos-Ridao A, Zamorano M, Requena I. Priorization of acoustic variables: Environmental decision support for the physical characterization of urban sound environments. Build. Environ., 45, 2010.
[16] Paunović K, Belojević G, Jakovljević B. Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. Sci. Total Environ., 481, 2014.

# ESTUDIO MORFOLÓGICO DE PANTALLAS ACÚSTICAS PARA MEJORA DE SU RENDIMIENTO ESTÉTICO-FUNCIONAL

PACS: 43.10.Qs

Moreno Balboa, María de la O; Demaría Casteñeda, Ignacio; Abad Toribio, Laura; Colorado Aranguren, David; Gabiola Ondarra, Francisco Javier; Velasco Fernández Ana Isabel.
Universidad Alfonso X El Sabio
Escuela Politécnica Superior
Avenida de la Universidad, 1
28691 Villanueva de la Cañada, Madrid
Tel: 34 91 810 92 00
Fax: 34 91 810 91 01
E-mail: mmorebal@uax.es; idemariac@gmail.com; labad@uax.es, dcoloara@uax.es; gabiola@uax.es, aivelfer@uax.es

## ABSTRACT

Different shape acoustic barriers have been studied placing a sound source with frequency controller in front of them. In order to configure the superficial textures, the geometric bodies have been classified in parallelepipeds, prismatics, pyramids, round geometric bodies and revolution solids. Each one can influence on the barrier surface adding or subtracting in a regular or random way. The acoustic attenuation produced has been obtained as the difference between the values readied by two sonometers placed behind and in front of the barrier. The industrial design axiom 'an effective shape can improve the functioning' has been proved once again

## RESUMEN

Se han caracterizado acústicamente pantallas de distintas morfologías, mediante su colocación frente a una fuente sonora de frecuencia controlada. Para la preconfiguración de las texturas superficiales se han clasificado los cuerpos geométricos en paralelepípedos, prismas, pirámides, cuerpos geométricos redondos y sólidos de revolución. Cada uno de ellos puede incidir en la superficie de la pantalla mediante adición, sustracción, de manera regular o aleatoria. La atenuación producida se ha obtenido por diferencia de las lecturas de dos sonómetros colocados en la parte anterior y posterior, constatando un axioma del diseño industrial: "el uso efectivo de la forma puede mejorar la función".

## 1. INTRODUCCIÓN.

Tal y como exponen algunos textos, en función de su forma y del material usado, las barreras acústicas, ofrecen distintos niveles de reducción del ruido. Para algunos tipos de barrera, aún no se dispone de datos suficientes sobre el rendimiento acústico como para poder predecir el impacto sobre el ruido para determinados puntos locales, [1].

Por otro lado, las pantallas acústicas afectan a la zona donde se implanten, y en concreto al entorno visual de los vecinos; constituyen, per se, un marco de comunicación con el viajero, que lo visualiza a 100 kilómetros por hora o con el espectador estático que lo contempla. Esta relación dinámico-estática queda enriquecida visualmente con la diversificación de las formas, que presentan los paramentos, evitando elementos organizados monótonamente con seriación inexpresiva.

Por último, el uso de elementos modulares, permite la generación de innumerables texturas superficiales que brindarán a la sociedad la consecución de pantallas antiruido versátiles sin olvidar el espíritu de todo diseño industrial, su fabricación en serie.

## 2.- DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO.

En la prefiguración de los objetos, cualquiera que fuera la índole de éstos, inciden variables muy distintas, a saber:

- Pragmáticas: aquéllas que se refieren a la utilidad (funciones de uso) y a los aspectos ergonómicos (adaptación a las condiciones físicas y psíquicas del usuario).
- Simbólicas: aquéllas que se refieren a los valores y códigos estéticos y culturales, [2].

### 2.1.-Evaluación Pragmática.

Para el análisis de la variable pragmática, o funcional, se ha utilizado un sistema que consta básicamente de una caja anecoica, un dispositivo electroacústico y 24 modelos a escala diferentes, generados a partir de la seriación de 9 motivos elementales previamente diseñados.

El sistema experimental utilizado para la evaluación funcional, está compuesto básicamente por un conjunto de elementos de ensayo específicos:

A. **Una caja anecoica:** Para realizar las mediciones acústicas se ha utilizado una caja, donde se pueden insertar los modelos a escala. Además, en su interior se puede colocar un sonómetro. La caja tiene como dimensiones totales: 50x70x52cm (medidas exteriores). Una de sus paredes es doble, de altura 44 cm, para poder llevar a cabo el ensayo, la pared situada frente a ésta ha sido eliminada, con el objetivo de poder situar los modelos como parte integrante de la caja. Esta caja ha sido ya fabricada y utilizada en la Universidad Alfonso X el Sabio para estudios de difracción en bordes de pantalla, [3], de atenuación acústica en hormigón con perlas de poliuretano expandido, [4], [5], y estudios morfológicos [6], [7].

B. **24 motivos elementales**, **para la generación de texturas superficiales**: Se ha partido del diseño un primer motivo elemental, denominado motivo elemental básico y codificado como 01, consistente en un paralelepípedo de sección cuadrada de 600mm de arista y 100mm de profundidad. Sobre este motivo elemental básico se han generado diferentes geometrías superficiales o texturas en base a la inserción de cuerpos geométricos. Han sido clasificados en seis grupos, dando de este modo nombre a los cuadros morfológicos, matrices generadoras de soluciones, a utilizar en la generación de las texturas superficiales:
    - Sólidos platónicos: Poliedros regulares, [9].
    - Paralelepípedos.
    - Prismas.
    - Pirámides.
    - Cuerpos geométricos redondos.
    - Sólidos de revolución.

    Cada uno de los cuerpos geométricos puede incidir en la superficie vertical, del motivo elemental básico, mediante adición, que produciría una textura convexa, o mediante sustracción, que produciría una textura cóncava. A su vez, en ambos métodos, se han considerado dos modos de distribución de los elementos geométricos en la superficie

vertical: de manera regular, en base a una red de puntos preestablecida, que genera texturas homogéneas, y aleatoria que genera texturas heterogéneas.

En base a la metodología expuesta, se diseñaron 49 motivos elementales que dieron lugar a 100 infografías en las que se muestran las diferentes texturas diseñadas. De entre los 49 motivos elementales diseñados, se seleccionaron mediante una evaluación en base a "metafunciones", [9], 24 motivos elementales, [6], [7].

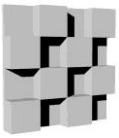
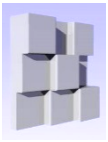
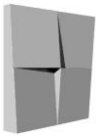
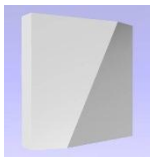
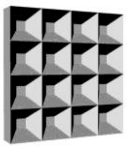
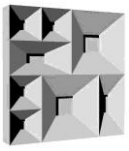
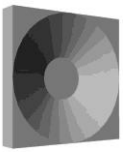
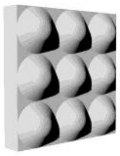
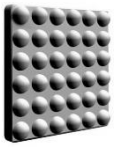
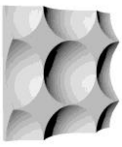
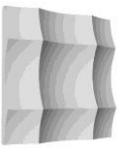
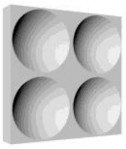
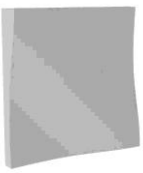
| | | | |
|---|---|---|---|
|  **MOT.EL:/01** *Figura 1: Motivo elemental 01, Superficie sin inserciones.* |  **MOT.EL:/02** *Figura 2: Motivo elemental 02, Hexaedro adición regular.* |  **MOT.EL:/03** *Figura 3: Motivo elemental 03, Hexaedro adición aleatoria.* |  **MOT.EL:/04** *Figura 4: Motivo elemental 04, paralelepípedo oblicuo adición aleatoria.* |
|  **MOT.EL:/05** *Figura 5: Motivo elemental 05, prisma triangular adición regular.* |  **MOT.EL:/06** *Figura 6: Motivo elemental 06, Pirámide cuadrangular truncada sustracción regular.* |  **MOT.EL:/07** *Figura 7: Motivo elemental 07, Pirámide cuadrangular truncada sustracción aleatoria.* |  **MOT.EL:/08** *Figura 8: Motivo elemental 08, cilindro parabólico sustracción regular.* |
|  **MOT.EL:/09** *Figura 9: Motivo elemental 09, Cilindro oblicuo sustracción aleatoria.* |  *MOT.EL:/010* *Figura 10: Motivo elemental 10, Cono recto sustracción regular.* |  *MOT.EL:/11* *Figura 11: Motivo elemental 11, Cono recto truncado sustracción regular.* |  *MOT.EL:/12* *Figura 12: Motivo elemental 12, Cono recto R:100mm sustracción regular.* |
|  *13: Motivo elemental 13, Cono recto R:100mm adición regular.* |  *MOT.EL:/14* *Figura 14: Motivo elemental 14, Esfera, radio 50mm, adición regular.* |  *MOT.EL:/15* *Figura 15: Motivo elemental 15, Esfera, radio 50mm, adición aleatoria.* |  *MOT.EL:/16* *Figura 16: Motivo elemental 16, Súper-esfera seccionada adición regula.* |
|  *MOT.EL:/17* *Figura 17: Motivo elemental 17, Elipsoide adición regular.* |  *MOT.EL:/18* *Figura 18: Motivo elemental 18, Paraboloide, foco 35mm, radio 150mm, sustracción regular.* |  *MOT.EL:/19* *Figura 19: Motivo elemental 19, Paraboloide, foco 150mm, sustracción regular* |  *MOT.EL:/20* *Figura 20: Motivo elemental 20, Paraboloide, radio 460mm, sustracción regular.* |
|  *MOT.EL:/21* *Figura 21: Motivo elemental 21, Paraboloide, radio 142mm, sustracción regular.* |  *MOT.EL:/22* *Figura 22: Motivo elemental 22, Paraboloide, radio 107mm, sustracción tubular regular.* |  *MOT.EL:/23* *Figura 23: Motivo elemental 23, Paraboloide, radio 107mm, sustracción tubular aleatoria.* |  *MOT.EL:/24* *Figura 24: Motivo elemental 24, Paraboloide hiperbólico adición regular.* |

*Tabla 1: motivos elementales seleccionados.*

Se han generado modelos a escala, basados en reproducciones de los motivos elementales seleccionados, de cara a realizar los ensayos en laboratorio.

En base a los datos obtenidos en los diferentes ensayos, se generaron tablas de medición, que contienen información sobre el número y denominación del motivo elemental generador de la pantalla acústica, la frecuencia de medición y la atenuación media de las mediciones seleccionadas, calculada como diferencia entre las medidas de Leq a ambos lados de la pantalla, según se indica en la ecuación (1-1):

$$Atenuación = L_{eq1} - L_{eq2} \qquad (1\text{-}1)$$

donde Leq1 son los valores registrados delante de la pantalla y Leq2 los valores registrados detrás de la pantalla, a partir de las cuales se llevaron a cabo las discusiones.

### 2.2.-Evaluación simbólica.

Para el análisis simbólico (estético) de los motivos elementales, se lanzó el **1er cuestionario para la evaluación estética de los motivos elementales planteados "ESTUDIO MORFOLÓGICO DE PANTALLAS ACÚSTICAS DISPERSAS Y SU APLICACIÓN AL DISEÑO DE UN MÉTODO PARA LA MEJORA DE SU RENDIMIENTO ESTÉTICO-FUNCIONAL"**. En el que se instó al conjunto muestral a seleccionar, de entre todos los motivos elementales, aquel que les pareciera el más agradable desde el punto de vista estético, [8].

## 3.- DISCUSIÓN Y ESTUDIOS COMPARATIVOS.

Se exponen a continuación evaluaciones estético-funcionales de los motivos elementales mediante comparaciones dos a dos. En ellas se pretende hacer comparaciones de motivos elementales similares desde el punto de vista de la geometría, para constatar qué modo de inserción, o qué tamaño de cuerpo geométrico tridimensional, es el más eficiente desde el punto de vista pragmático, funcional, atenuación del ruido y desde los puntos de vista simbólico, estético, así como de atracción por parte de los individuos encuestados. Se realizaron en total 12 comparaciones:

1. Discusión motivo elemental 02 frente al motivo elemental 01.
2. Discusión motivo elemental 04 frente al motivo elemental 05.
3. Discusión motivo elemental 06 frente al motivo elemental 07.
4. Discusión motivo elemental 08 frente al motivo elemental 09.
5. Discusión motivo elemental 10 frente al motivo elemental 11.
6. Discusión motivo elemental 12 frente al motivo elemental 13
7. Discusión motivo elemental 14 frente al motivo elemental 15.
8. Discusión motivo elemental 16 frente al motivo elemental 17.
9. Discusión motivo elemental 18 frente al motivo elemental 19
10. Discusión motivo elemental 20 frente al motivo elemental 21.
11. Discusión motivo elemental 22 frente al motivo elemental 23.
12. Discusión motivo elemental 01 frente al motivo elemental 24

Dada la extensión del ensayo se presenta a continuación, a modo ilustrativo, la primera de las discusiones estético-funcionales.

### 3.1.- Discusión motivo elemental 02 frente al motivo elemental 01.

La discusión que aquí se plantea, pretende expresar, cuál de las dos geometrías obtenidas a partir de la inserción de un mismo cuerpo geométrico es más eficiente. Nos encontramos con

dos motivos elementales similares, en ambos casos se han concebido a partir de la inserción, sobre el motivo elemental básico de un hexaedro, [8].

- El motivo elemental 02, Hexaedro adición regular, MOT.EL./02, se obtiene al sustraer al motivo elemental básico un hexaedro de lado 150mm. La inserción en este caso se ha llevado a cabo de manera regular.
- El motivo elemental 03, Hexaedro adición aleatoria, se ha generado, MOT.EL./03, al sustraer del motivo elemental básico un hexaedro de 200mm de lado. Dichas inserciones se han llevado a cabo a diferentes profundidades y de modo aleatorio.

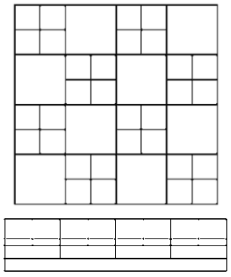


*Figura 25: Alzado motivo elemental 02, Hexaedro adición regular.*

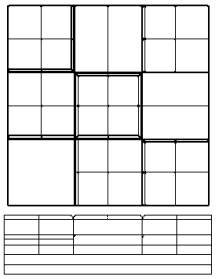


*Figura 26: Alzado motivo elemental 03, Hexaedro adición aleatoria*

### 3.1.1- Comparación pragmática. Eficiencia ante el ruido.

A continuación se presentan los datos relativos a cómo responden ambas pantallas frente a la atenuación del ruido.

En la tabla 2 se muestran datos relativos a la media de atenuaciones de cada motivo elemental frente al ruido de las diferentes frecuencias ensayadas. Las celdas marcadas en color indican cual es la atenuación superior, en una comparación frente a la frecuencia nombrada en la misma fila. Por otro lado se indica mediante el color naranja oscuro, cual es el motivo elemental mayor número de veces superior, frente a las atenuaciones a diferentes frecuencias de sonido.

| | | Atenuación media (dBA) | | |
|---|---|---|---|---|
| FRECUENCIA (Hz) | % MEJORA EN LA ATENUACION | MOT.EL./02 V=22500000mm$^3$ | MOT.EL./03 V=35953363mm$^3$ | % MEJORA EN LA ATENUACION |
| **63** | | **6,5** | **7,9** | 21,3 |
| **100** | 31,9 | **9,5** | **7,2** | |
| **160** | | **5,4** | **8,9** | 65,4 |
| **250** | | **18,2** | **23,9** | 31,3 |
| **400** | 223,1 | **4,2** | **1,3** | |
| **630** | | **0** | **1,6** | |
| **1000** | | **3,0** | **6,3** | 112,1 |
| **1500** | 11,3 | **8,9** | **8,0** | |
| **2000** | | **2,9** | **3,6** | 21,1 |
| **3000** | | **11,2** | **12,7** | 13,8 |
| **4000** | | **10,9** | **15,4** | 40,7 |
| **5000** | | **11,6** | **16,2** | 40,3 |

*Tabla 2: Tabla comparativa eficiencia motivos elementales 02 y 03.*

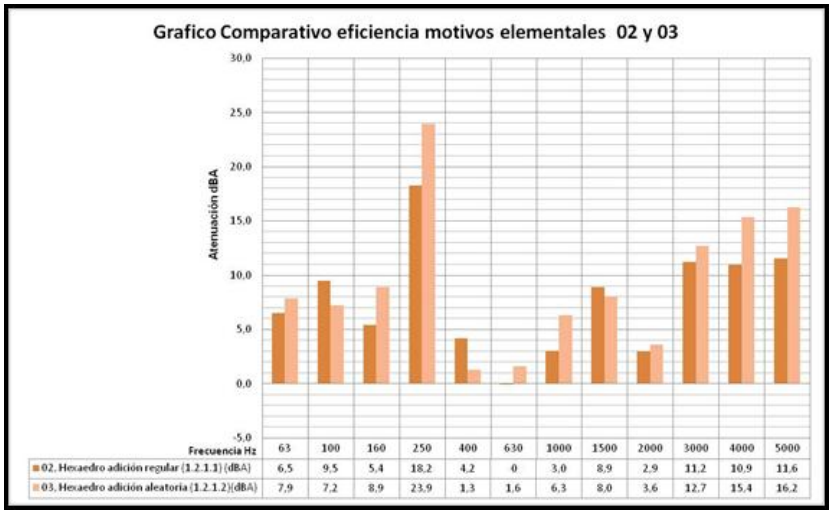



*Figura 27: Gráfico Discusión parcial: Evaluación Eficiencia motivos elementales 02 y 03.*

Como podemos apreciar en esta tabla de comparación, el MOT.EL./03 es más eficiente frente al ruido, ya que las atenuaciones medias efectuadas frente a las frecuencias ensayadas, son superiores en la mayoría de los casos. Esta superioridad puede ser debida al mayor volumen del MOT.EL./03, de 35953363mm$^3$, frente a los 22500000mm$^3$ de volumen, que tiene el MOT.EL./02. Salvo para frecuencias como 100Hz, 400 Hz y el caso aislado de 15000 Hz, el MOT.EL./03, parece atenuar mejor el ruido, no habiendo diferencias de atenuación superiores a 6dB entre ellas, siendo el caso extremo la frecuencia de 250Hz. Para determinadas frecuencias, tales como 250, 3000, 4000 y 5000 Hz, con ambos motivos elementales, aunque no en igual medida, atenúan significativamente el nivel de decibelios.

Por último, cabe reseñar que para las frecuencias más bajas (63, 100 y 160 Hz) las atenuaciones se mantienen constantes alrededor de 8 dB de media como máximo; en el caso del MOT.EL./03, sin grandes variaciones y en el caso del MOT.EL./02, con variaciones de +- 4 dB.

### 3.1.2- Comparación simbólica. Eficiencia ante los consumidores.

Se exponen, a continuación, los datos relativos a la evaluación estética llevada a cabo por 100 individuos encuestados en el 1er cuestionario planteado para la evaluación estética de los motivos elementales propuestos.

La pregunta que aquí nos ocupa es la nº 1, ¿Cuál de estas dos piezas, le parece más agradable estéticamente?, del cuestionario planteado.

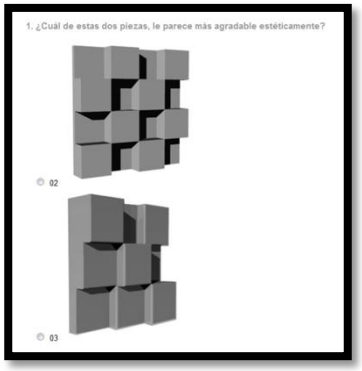



*Figura 28: Visualización pregunta nº 1, relativa a la comparación de los motivos elementales 02 y 03*

A continuación se muestra el informe de resultados para la pregunta 1, comparación entre los motivos elementales 02 y 03.

| 1 - ¿Cuál de estas dos piezas, le parece más agradable estéticamente? | | |
|---|---|---|
| Motivo elemental | Respuestas total | Porcentaje |
|  02, Hexaedro adición regular | **45** | **45%** |
|  03, Hexaedro adición aleatoria | **55** | **55%** |

*Tabla 3: Tabla de resultados encuesta relativa a los motivos elementales 02 y 03.*

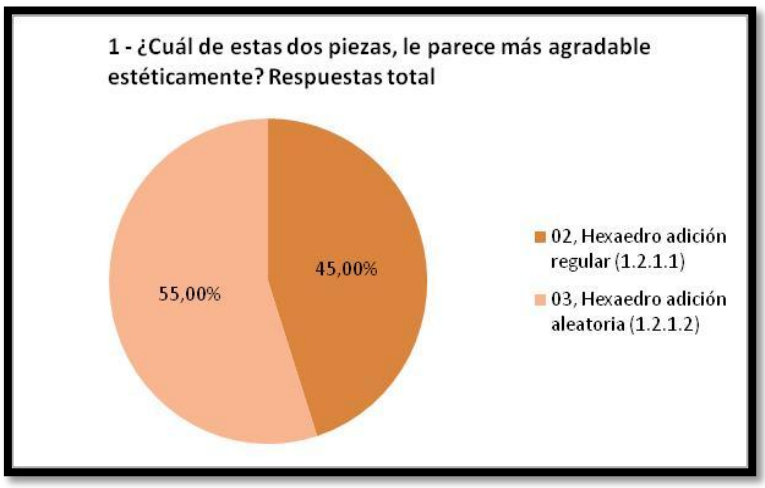



*Figura 29: Gráfico de visualización de los resultados para la encuesta relativa a la pregunta nº1, relativa a la comparación de los motivos elementales 02 y 03.*

Tal y como se aprecia en la figura 29, el MOT.EL./03, se muestra más agradable estéticamente para el 55% de los encuestados, siendo la diferencia con el MOT.EL./02, pequeña de tan solo un 5% de los encuestados: Nos encontramos ante la circunstancia, en la que las comparaciones funcional y estética arrojan como motivo elemental más eficiente al MOT.EL./03, por lo que podríamos pensar que es más eficiente el modo de inserción aleatorio que el modo de inserción regular.

## 4.- CONCLUSIONES.

### 4.1. Variable de inserción, adición o sustracción:

Desde el punto de vista funcional, en el 100% de los casos, es el modo de inserción mediante adición superior al modo de inserción mediante sustracción. Por otro lado, desde el punto de vista estético, ambos modos de inserción parecen eficientes en igual medida. Por lo que podemos concluir afirmando, que el modo de inserción mediante adición es más eficiente desde el punto de vista funcional (atenuación del sonido).

### 4.2. Variable de distribución, regular o aleatoria:

Desde el punto de vista funcional, en el 66,6% de los casos, es el modo de distribución aleatorio superior al modo de distribución regular. En la evaluación estética, en el 66,6% de los

casos, es el modo de distribución aleatorio superior al modo de distribución regular. Por lo que podemos concluir afirmando que el modo de distribución aleatorio es más eficiente, tanto funcional como estéticamente.

### 4.3. Variable volumen, mayor o menor volumen.

Desde el punto de vista funcional, en el 81.8% de los casos, son los motivos elementales con mayor volumen superiores desde el punto de vista funcional (atenuación del ruido). En cuanto a la estética, en el 54,5% de los casos, son los motivos elementales con mayor volumen superiores desde el punto de vista estético, atracción por parte del usuario. Por lo que podemos concluir afirmando, que los motivos elementales con mayor volumen son más eficientes, tanto funcional como estéticamente.

## 5. REFERENCIAS

[1] KLOTH, M., VANCLUYSEN, K., CLEMENT, F. (2007) *Practitioner Handbook for Local Noise Action Plans—Recommendations from the SILENCE project*. AVL List GmbH: Austria. 128 p.

[2] PIBERNAT, O. (1986). El diseño en la empresa. INFE. Madrid.

[3] SERRANO PEREZ, M (2011) *Estudio de la difracción en el borde superior de las pantallas acústicas. Aplicación al diseño de las secciones de coronación y comparativa de la eficacia de la pantalla en función de la sección transversal.* Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X El Sabio. Madrid: 2011.

[4] COLORADO, D. (2011) *Estudio de la atenuación del sonido en el hormigón, en función de su densidad y espesor, aplicación al diseño de barreras acústicas.* Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X El Sabio. Madrid, 2011.

[5] COLORADO, D., ABAD, L., COUCEIRO, L., GARCÍA, T., MAGRO, R., SERRANO, M. (2010) *Atenuación acústica en hormigón con perlas de poliuretano expandido*. Tecniacústica León 2010 ISBN: 978-84-87985-19-5. Número especial de la Revista de Acústica Vol. 41

[6] MORENO, M., ABAD, L., SERRANO, M., ABAD, L., COLORADO, D., DOMÍNGUEZ, J., *Estudio morfológico de pantallas acústicas dispersas. Reflexión de ondas y textura superficial. Valoración de la incidencia en el rendimiento estético-funcional.* Conama 10. Madrid, 22 al 26 de noviembre de 2010.

[7] MORENO BALBOA, M. (2012) *Diseño de un método para la mejora del rendimiento estético-funcional de pantallas acústicas dispersas. Reflexión de ondas y textura superficial. Estética y redes modulares.* Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X El Sabio. Madrid:

[8] SUTTON, D. (2005). *Sólidos platónicos y arquimedianos*. Oniro S.A. ISBN 84-9754-131-6.

[9]. BONSIEPE, G. (1978) Teoría y Práctica del Diseño Industrial; Gustavo Gili, S.A., Barcelona. 1978. ISBN: 84-252-0697-9

# MÉTODOS DE SIMPLIFICACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RUIDO DE CIUDADES.

PACS: 43.50.Rq

Bastián Monarca; Nicolás [1]; Suárez Silva; Enrique [2]
[1] Departamento Comercial, Área Comercial
Silentium, Ingeniería del Silencio
José Ananías 207 A, Santiago, Chile
Tel. +56 2 24489820
E-mail: nbastian@silentium.cl
[2] Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Miraflores, Valdivia, Chile
Tel. +56 63 2221339
E-mail: enriquesuarez@uach.cl

## ABSTRACT

This work presents simplified methods to generate a cost-effective noise maps. The methods are based on simplifications of both the buildings, which are treated as representative blocks, and the traffic flow. The noise map is implemented using a road traffic noise model and specialized modelling software. Two studies conducted in Chile in which the methods were applied are presented.

## RESUMEN

En este trabajo se presentan métodos de simplificación para elaborar mapas de ruido de ciudades a un bajo costo de implementación. Los métodos se basan en la simplificación de las edificaciones de toda la ciudad en bloques representativos y en la simplificación del flujo de tránsito vehicular. La confección del mapa de ruido se hace a través de un modelo de ruido de tránsito vehicular y software de modelación. A modo de ejemplo, se presentan dos estudios efectuados en Chile, en los cuales se aplicaron estos métodos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La elaboración de mapas de ruido de ciudades se ha transformado en una herramienta de diagnóstico fundamental para establecer estrategias de gestión de control de ruido ambiental en todo el mundo. En algunos países no existen ni la información ni los recursos para elaborar mapas de ruido con rigurosidad. Por lo anterior, el utilizar métodos de simplificación para confeccionar mapas de ruido se ha convertido en una real necesidad para la comunidad científica acústica de países con escasos recursos. Respecto a los métodos de simplificación, se han simplificado las edificaciones en bloques representativos, el flujo de tránsito vehicular se ha clasificado en categorías, se realizó una segregación de vehículos entre livianos, pesados y motocicletas para contabilizar el flujo vehicular, se asumió una velocidad promedio de los vehículos para cada categoría de vía, se realizaron mediciones de nivel de presión sonora continuo equivalente en distintos puntos de la ciudad y se utilizó un modelo de ruido de tránsito

vehicular para elaborar el mapa de ruido de la ciudad. Posterior a esto, se elaboró el mapa de ruido de tránsito vehicular mediante el software CadnaA (Computer Aided Noise Abatement).

Respecto a la efectividad de los métodos de simplificación, la *Guía de Buenas Prácticas para Mapas Estratégicos de Ruido y la Producción de los Datos de Exposición al Ruido* (desde ahora *Guía de Buenas Prácticas*) [1] tiene metodologías muy similares a las empleadas, con una evaluación de los métodos desde el punto de vista de precisión, complejidad y costo y también con el margen de error que presentan los métodos. Además, se muestra una comparación entre los niveles medidos y modelados.

## 2. METODOS DE SIMPLIFICACIÓN

Tienen relación con los datos de entrada que se deben incorporar al software de modelación y están relacionados con la categorización de vías de la ciudad, agrupación y alturas de edificaciones y con la velocidad de los vehículos que pasan por las vías.

### 2.1. Categorización de Vías

Se utilizó una categorización de vías oficial de Chile, dada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo en el Manual de Vialidad Urbana, la cual clasifica las vías urbanas en expresa, troncal, colectora, de servicio y local [2].

La ventaja de clasificar las vías en distintas categorías es que ayuda con la estratificación estadística, reduce el número de mediciones acústicas y de flujo vehicular y permite estudiar una zona más amplia de la ciudad [3]. Además, se ha demostrado que categorizar es adecuado para la descripción de ruido en ciudades medianas [4] y claramente tiene una mejor capacidad de predicción que el método estándar de la retícula [5][6]. Complementando lo anterior, estudios recientes [7] han mostrado que el utilizar el método de categorización de vías desde un punto de vista de funcionalidad, puede ser aplicado para estudiar otros contaminantes relacionados con el tránsito (además del ruido).

### 2.2. Agrupación de Edificaciones y Estandarización de Alturas

La simplificación que se empleó fue con respecto a la altura de edificios y al grupo de viviendas, utilizando una altura en común para todos los edificios y bloques representativos para los grupos de viviendas [8].

Esta estrategia focaliza los resultados a los niveles en la fachada de los edificios, ya que se conserva la fachada más expuesta al ruido de tránsito vehicular.

En el proceso de simplificación de grupo de viviendas, se tuvieron los siguientes criterios [3]:

a) **Fachada continua**: la simplificación consiste en la fusión de todas las unidades de vivienda/edificaciones en un bloque que representa toda la manzana. El borde de dicho bloque corresponde a la unificación de las fachadas enfrentadas a la calle.
b) **Fachada discontinua**: en base a la clasificación anterior, se define como fachada discontinua a aquellas que presentan intersticios, separación entre edificaciones. En este caso se optó por ignorar dichas discontinuidades y completar el borde del bloque a semejanza del caso anterior. Se consideró un criterio similar para el caso de calles sin salida, accesos a condominios y calles peatonales al interior de la manzana.
c) **Manzana parcialmente ocupada**: se crea un bloque correspondiente a la superficie ocupada. Se pueden diferenciar dos casos particulares:

i) Conjunto de edificaciones agrupado en una sección de la manzana. Por lo general corresponde a grupos de viviendas, y el bloque se construye de acuerdo a criterios anteriores aplicado al área utilizada.

ii) Edificaciones aisladas distribuidas al interior de la manzana, que por su dimensión y emplazamiento es fácil distinguir las unidades como individuales y no como parte de un agrupamiento. No se construye bloque, se considera la edificación.



Figura 1. Ejemplo de simplificación de edificaciones. Se destaca caso de condición manzana parcialmente ocupada. Fuente: [3].

### 2.3. Estandarización de Velocidades de Vehículos

Se consideraron velocidades estándar para cada categoría de vía.

### 2.4. Análisis de las Simplificaciones Empleadas

El documento *Guía de Buenas Prácticas* [1], tiene por objetivo ayudar a los países que están dentro de la Comisión Europea a realizar mapas de ruido de forma competente y también obtener información adecuada según la Directiva Europea 2002/49/EC [9]. Entre las recomendaciones referentes a la información a trabajar, se encuentra el flujo vehicular diario de la ciudad, la velocidad de los vehículos, las áreas verdes que existan, etc. Cada recomendación es caracterizada por el grado de complejidad, precisión y costo que ésta tiene, las cuales se dividen en seis intervalos (ver Tabla 1).

Tabla 1. Valoración y error estimado de cada parámetro en los distintos intervalos. Fuente: [1].

| Colour code to rate Tools | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| complexity | colour code | accuracy | colour code | cost | colour code |
| simple | | low | > 5 dB | inexpensive | |
| - | | - | 4 dB | - | |
| - | | - | 3 dB | - | |
| - | | - | 2 dB | - | |
| - | | - | 1 dB | - | |
| sophisticated | | high | < 0.5 dB | expensive | |

Lamentablemente, en el documento sólo se menciona la valoración de los valores extremos de cada parámetro (el mejor y peor caso), lo que es poco preciso al situarse entre los intervalos medios de cada parámetro (ver Tabla 1).

Por este motivo se propone utilizar el siguiente rango que se muestra en la Tabla 2, basando en los valores extremos dados en el documento (mínimos y máximos) y los valores medios que los autores estimaron como los más convenientes para cada caso.

Respecto al error de cada recomendación, dependiendo del intervalo en que se esté, los valores varían entre 5 a 0,5 dB. En la Tabla 2 se muestra cada intervalo con su posible error.

Tabla 2. Valoración y error estimado de cada nivel.

| Complejidad | Precisión | Costo | Error |
|---|---|---|---|
| Muy simple | Muy impreciso | Muy barato | > 5 dB |
| Simple | Impreciso | Barato | 4 dB |
| Normal | Normal | Normal | 3 dB |
| Medianamente difícil | Medianamente preciso | Medianamente caro | 2 dB |
| Difícil | Preciso | Caro | 1 dB |
| Muy difícil | Muy preciso | Muy caro | < 0,5 dB |

Analizando las recomendaciones del documento y comparando con los métodos de simplificación que se utilizaron para desarrollar este trabajo, se puede ver en la Tabla 3 un análisis de la metodología empleada.

Tabla 3. Análisis de la metodología empleada.

| Información disponible | Recomendación | Complejidad | Precisión | Costo |
|---|---|---|---|---|
| No hay información respecto al flujo vehicular | Seleccionar un tipo de carretera y hacer un conteo de flujo, luego extrapolar a otras carreteras del mismo tipo | Muy difícil | Medianamente preciso | Medianamente caro |
| No hay información respecto a las velocidades | Suponga una velocidad media en función de la experiencia de carreteras del mismo tipo | Muy simple | Medianamente preciso | Normal |
| No hay información respecto a la altura de los edificios | Realizar visitas in situ y contar el número de pisos, luego multiplicar cada piso por una altura promedio | Muy difícil | Preciso | Medianamente caro |

Por lo tanto, basado en las recomendaciones de la *Guía de Buenas Prácticas* [1], si bien el utilizar los métodos de simplificación expuestos anteriormente puede ser bastante tedioso y de un costo relativamente alto, la precisión que se obtiene es bastante buena (±2dB).

## 3. METODOLOGÍA

Se elaboraron los mapas de ruido utilizando el software CadnaA, tomando en consideración la metodología desarrollada en otros estudios realizados en Chile [10][11][12]. El proceso de modelación se llevó a cabo incorporando al software de modelación información cartográfica y de flujo vehicular. En estos trabajos, los mapas de ruido que se obtuvieron, se limitan al ruido generado por el tránsito vehicular.

Para desarrollar los mapas de ruido, se debió realizar un análisis de la trama circulatoria (tipo de carpeta, número de vehículos, etc.), flujo vehicular (segregado entre vehículos livianos, pesados y motos), edificación en altura, topografía, etc.

### 3.1. Proceso de Modelación

Primero se tuvo que obtener toda la información necesaria para poder desarrollar el modelo en el software, en este caso la metodología empleada fue la siguiente:

a) Se obtuvo información cartográfica de la ciudad (calles, edificios, áreas verdes, etc.).
b) Se verificó la información obtenida mediante visitas en terreno.
c) Se realizó una categorización de las vías de la ciudad.
d) Se realizaron mediciones acústicas y de flujo vehicular.
e) Se compararon los niveles proyectados por los modelos de ruido de tránsito vehicular con los niveles medidos en terreno.
f) Se escogió el modelo de predicción más apropiado.

Después de haber realizado los pasos que se mencionaron anteriormente, se procedió a trabajar en el software de la siguiente forma:

a) Se importó la información cartográfica al software.
b) Se aplicaron métodos de simplificación en el software.
c) Se estableció el escenario de modelación: calles, edificios, curvas de nivel, etc.
d) Se escogió el modelo de predicción a utilizar (modelo Alemán RLS-90) [13].
e) Se obtuvo el mapa de ruido mediante la modelación con el software.
f) Se comparó los resultados entregados por el software con mediciones acústicas.

### 3.2. Altura de Modelación

Si bien las recomendaciones de la Directiva 2002/49/CE [9] son que se realicen mapas de ruido a una altura de 4 metros, en el presente estudio se optó en utilizar una altura de 1,5 metros, ya que las mediciones acústicas de comparación se realizaron a esa de altura.

### 3.3. Mapa de Ruido

Se utilizó un coeficiente de absorción promedio para los edificios, el cual es de $\alpha = 0{,}4$ [1].

Para las áreas verdes, el parámetro G se considera con un valor de 0,5 (suelo semi – poroso). Teniendo en cuenta que la norma ISO 9613-2 considera un valor G=0 como suelo duro (concreto, agua, etc.) y G=1 corresponde a suelo blando (poroso) [14].

Para el cálculo de mapas, se seleccionó un espaciado de receptores de 10 metros, valor recomendado por la directiva EC 2002-49 [9]. Además, la altura de evaluación es de 1,5 m.

Para la apariencia de los mapas se utilizan las recomendaciones de la directiva EC 2002-49 [9], lo que implica que los rangos de niveles sean de 5 dB.
El mapa de ruido representar niveles de presión sonora en tramos de 5 dB con distintos colores, acorde a lo establecido en la norma ISO 1996-2 [15]. Además, se siguieron las recomendaciones entregadas por el *Grupo de Trabajo de Evaluación a la Exposición al Ruido de la Comisión Europea* [16].

## 4. CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio son dos proyectos que fueron realizados en la ciudad de Santiago de Chile el año 2011 y en la ciudad de Valdivia el año 2013. Ambos contemplaron un mapa de ruido diurno, categorización de vías de flujo vehicular utilizando la clasificación vial oficial de Chile y mediciones acústicas acorde a lo descrito en la norma ISO 1996-2:2007 [17]

Ambos estudios contemplaron separación de vehículos livianos, pesados y motos y fue posible concluir que las categorías Colectora y Servicio muestran gran similitud, a tal punto que para estudios acústicos podrían agruparse como una sola categoría.

Referente a la tipología de edificaciones, se utilizaron bloques representativos de grupos de viviendas, edificios y/o manzanas. Ambos estudios incluyeron un análisis de esta simplificación respecto a su impacto acústico, concluyendo que los posibles errores son muy poco significativos. Además, la altura de modelación es de 1,5 m, y se utilizaron dos alturas de bloques de edificaciones: 4 m en manzanas donde sólo hay viviendas de uno y dos pisos, y 10 m para los otros casos con edificaciones de más alturas.

En ambos estudios, el análisis de flujos de tránsito y niveles de ruido según tipo de vía confirmó como adecuada la utilización de las categorías de las vías. Los flujos y los niveles (promedios, mínimos y máximos) muestran la tendencia de disminución al bajar de categoría desde Expresa a Local.

### 4.1. Mapa de Ruido del Gran Santiago (2011)

Se realizó un análisis de flujos de tránsito vehicular y de niveles de ruido mediante el estudio de 1.057 mediciones. De los 1.057 datos, 721 corresponden a horario valle (9:00 – 18:00 / 20:00 – 21:00) y 336 a horario punta (7:00 – 9:00 / 18:00 – 20:00).

El proceso de modelación contempló ingresar los datos promedio de flujo vehicular diferenciado por horario, tipo de vía y zona, con excepción de las vías expresas que se trataron como un solo tipo de vía para toda la superficie de estudio, por sus propias características.

Respecto a la diferencias entre los datos medidos y modelados, en la tabla 4 se muestra un análisis con 191 datos, diferenciados por tipo de vía.

**Tabla 4. Ejercicio de comparación entre Leq medido v/s Leq modelado.**

| Categoría de vía | Cantidad de datos | Leq Promedio Medido (dBA) | Leq Promedio (dBA) | Promedio Diferencia Absoluta | Desviación Estándar Diferencia Absoluta |
|---|---|---|---|---|---|
| **Expresa** | 4 | 73,3 | 75,0 | 1,7 | 1,1 |
| **Troncal** | 80 | 71,8 | 72,9 | 1,5 | 1,4 |
| **Colectora** | 59 | 68,4 | 70,1 | 2,1 | 1,7 |
| **Servicio** | 19 | 66,5 | 68,1 | 2,6 | 3,1 |
| **Local** | 29 | 61,2 | 62,2 | 3,1 | 3,3 |

### 4.2. Mapa de Ruido de Valdivia (2013)

Se realizó un análisis de flujos de tránsito vehicular y de niveles de ruido mediante el estudio de 80 mediciones entre las 9:00 y 18:00 sin diferenciar entre horario valle y punta.

Respecto a la clasificación vial, se consideraron vías Colectoras o de Servicio como una sola categoría, debido a que en la ciudad de Valdivia no existen vías de Servicio.

El proceso de modelación contempló ingresar los datos promedio de flujo vehicular y tipo de vía.

Respecto a la diferencias entre los datos medidos y modelados, en la tabla 5 se muestra un resumen por tipo de vía.

Tabla 5. Ejercicio de comparación entre modelación y mediciones.

| Categoría de vía | Cantidad de datos | Leq Promedio Medido (dBA) | Leq Promedio Modelado (dBA) | Promedio Diferencia Absoluta | Desviación Estándar Diferencia Absoluta |
|---|---|---|---|---|---|
| **Expresa** | 10 | 73,7 | 72,9 | 1,9 | 1,7 |
| **Troncal** | 24 | 70,4 | 69,8 | 4,6 | 3,0 |
| **Colectora o Servicio** | 36 | 68,2 | 67,3 | 3,0 | 2,7 |
| **Local** | 10 | 58,5 | 59 | 4,9 | 2,4 |

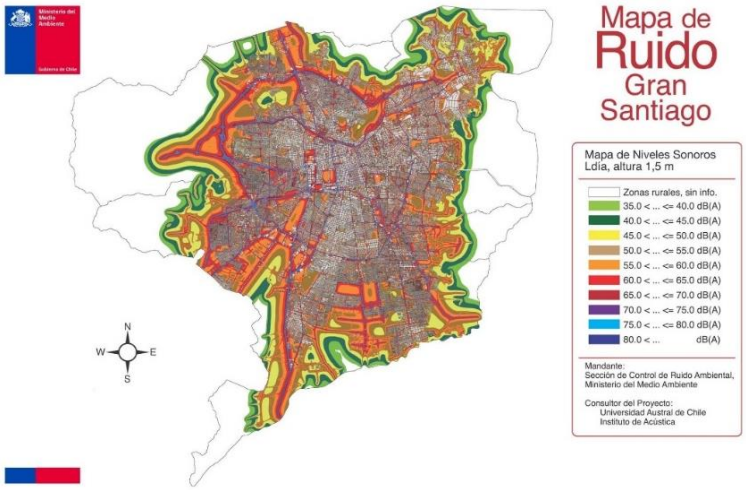



Figura 2. Mapa de Ruido del Gran Santiago. Fuente: [18].




Figura 3. Mapa de Ruido de la ciudad de Valdivia.

## 5. CONCLUSIONES

Se pueden confeccionar mapas de ruido a través de un método hibrido, basado en metodología de viales, modelos predictivos y simplificaciones cartográficas y de flujo vehicular, obteniendo datos acústicos confiables que muestran la distribución del ruido en toda ciudad.

La metodología empleada permite desarrollar mapas de ruido de manera efectiva y económica, adecuándose a la realidad de Chile.

Además, la metodología presentada se puede aplicar a pequeñas ciudades (como Valdivia, 155.000 habitantes) y también a grandes ciudades (como Santiago de Chile, sobre 5.000.000 de habitantes) obteniendo información valida sobre el comportamiento acústico de la ciudad.

La simplificación de vías debe ser revisada y ajustada en una ciudad pequeña como Valdivia, ya que existe variación de flujo vehicular y nivel de presión sonora entre vías que comparten la misma categorización, como las vías Troncales y Locales. Una opción es crear una clasificación vial que segregue las vías con alto flujo y bajo flujo vehicular o bien, incluir otras formas de subclasificar las vías, como aquellas vías con presencia de buses y microbuses y las que no tienen ese tipo de flujo vehicular.

Finalmente, es importante destacar que estas metodologías son concordantes con la Comunidad Europea según la *Guía de Buenas Prácticas* [1].

## REFERENCIAS

[1] WG-AEN: Assessment of exposure to noise. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure, version 2. European Commission Working Group, August 2007.
[2] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU (2009). Manual de Vialidad Urbana 2009, "Recomendaciones para el Diseño de Elementos de Infraestructura Vial Urbana (REDEVU) 2009". [http://www.minvu.cl/opensite_20070404110715.aspx]
[3] Suárez, E.; Barros, J.L. Traffic Noise Mapping of the City of Santiago de Chile. Science of the Total Environment. Volumes 466-467, 1 January 2014, Pages 539-546.
[4] Barrigón Morillas, JM.; Gómez Escobar, V.; Méndez Sierra, JA.; Vílchez-Gómez, R.; Vaquero, JM.; Trujillo Carmona, J. A categorization method applied to the study of urban road traffic noise. J acoust Soc Am 2005;17:2844-52.
[5] Barrigón Morillas, JM.; Gómez Escobar, V.; Méndez Sierra, JA.; Vílchez-Gómez, R.; Carmona del Río, FJ.; Trujillo Carmona, J. Analysis of the prediction capacity of a categorization method for urban noise assessment. Appl Acoust 2011;72:760-71.
[6] Rey Gonzalo, G.; Barrigón Morillas, JM.; Gómez Escobar, V. Analysis of noise exposure in two small towns. Acta Acustic 2012;98:884-93.
[7] Rey Gonzalo, G.; Barrigón Morillas, JM.; Gómez Escobar, V. Urban streets functionality as a tool for urban pollution management. Sci Total Environ 2013;461-462:453-61.
[8] Ausejo, M.; Recuero, M.; Asensio, C.; Pavón, I. & López, J. M. Study of Precision, Deviations and Uncertainty in the Design of the Strategic Noise Map of the Macrocenter of the City of Buenos Aires, Argentina. Environ Model Assess 2010; 15, p. 125–135.
[9] Directive of The European Parliament and of The Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise; 2002/49/ECC.
[10] Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Elaboración de Mapas de Ruido mediante Software de Modelación, para Caso Piloto (Comunas de Antofagasta y Providencia) (Contrato N° 01-059/09). Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile; 2009.
[11] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido Comuna De Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación Nº 1588-67-LE10. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile; 2010.
[12] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido del Gran Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación Nº 608897-12-LE11. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile; 2011.
[13] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-90, Der Bundesminister für Verkehr, 1990.
[14] International Organization for Standardization. *International Standard ISO 9613-2:1996, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General Method of Calculation*. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics; 1996.
[15] International Organization for Standardization. International Standard ISO 1996-2: 2007, *Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures.* International Organization for Standardization; 2007, Switzerland.
[16] WG-AEN: Presenting Noise Mapping Information to the Public. A Position Paper from the European Environment Agency Working Group on the Assessment of Exposure to Noise. European Commission Working Group, March 2008.
[17] International Organization for Standardization. International Standard ISO 1996-2: 2007, *Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures.* International Organization for Standardization; 2007, Switzerland.
[18] Suárez, E.; Quezada, R. Avances en Mapas de Ruido en Chile. Tecniacustica 2013 – 44° Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, EAA European Symposium on Environmental, Acoustics and Noise Mapping.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ELECCIÓN DE UN MODELO DE RUIDO DE TRÁNSITO VEHICULAR PARA CHILE.

PACS: 43.50.Rq

Bastián Monarca; Nicolás [1]; Álvarez Rodenbeek; Juan Pablo [2]; Suárez Silva; Enrique [3]; Báez Montenegro; Andrea[4]
[1] Departamento Comercial, Área Comercial
Silentium, Ingeniería del Silencio
José Ananías 207 A, Santiago, Chile
Tel. +56 2 24489820
E-mail: nbastian@silentium.cl
[2] Departamento de Proyectos, Área Proyectos
Acústica Austral, Medio Ambiente
Diego Portales 860, Puerto Montt, Chile
Tel. +56 65 2395990
E-mail: jpalvarez@acusticaustral.cl
[3] Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Miraflores, Valdivia, Chile
Tel. +56 63 2221339
E-mail: enriquesuarez@uach.cl
[4] Instituto de Estadística, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Teja, Valdivia, Chile
Tel. +56 63 2293227
E-mail: abaez@uach.cl

## ABSTRACT

A comparative analysis of predictive traffic noise models is presented. Noise mapping data conducted in nine cities of Chile, including Santiago, are considered. The approach used includes field measurements and modeled data. This allowed us to determine what model might suit best to the characteristics of the country.

## RESUMEN

Se realiza un análisis comparativo del comportamiento de algunos modelos predictivos de ruido de tránsito vehicular. Se utilizan datos de mapas de ruido realizados en nueve ciudades de Chile, incluyendo el Gran Santiago (capital). La discusión se basa en mediciones en terreno y datos modelados, permitiendo analizar qué modelo se adapta de mejor manera a las características del país.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de modelos de ruido de tránsito vehicular se ha convertido en una herramienta fundamental para evaluar los niveles de ruido de ciudades en Chile. El Ministerio del Medio Ambiente en Chile ha desarrollado una línea de trabajo que apunta a obtener mapas de ruido de las capitales regionales mediante software de modelamiento, considerando al tránsito vehicular como su principal fuente de ruido. Hasta ahora, se han desarrollado trabajos con modelos de ruido de tránsito vehicular en Antofagasta y Providencia [1], Santiago [2], en el Gran Santiago

(Capital de Chile) [3], Temuco, Padre Las Casas, Coquimbo, La Serena y Valdivia [4][5] y Osorno [5][6]. Las ciudades estudiadas difieren entre sí, en su ubicación geográfica, cantidad de habitantes, entre otras

Es importante destacar que Chile es el tercer país de América Latina con mayor número de vehículos por habitante. Además, en el mercado nacional es muy heterogéneo: hay 65 marcas de vehículos livianos, 28 de vehículos pesados, y 20 de buses. Esta cantidad de marcas y modelos, unido con la diversidad del estado de los caminos y los hábitos del conductor, hacen que el flujo vehicular sea muy particular de caracterizar. Por esta razón, antes de iniciar estudios en el desarrollo de un modelo de predicción de ruido de tránsito propio, paree razonable estudiar modelos extranjeros y conocer su comportamiento en Chile. Este conocimiento podrá impulsar el desarrollo de un modelo propio, adaptado a las características locales. Los modelos de predicción de ruido analizados, corresponden a aquellos que han tenido un buen comportamiento en estudios previos.

La búsqueda de un modelo de predicción de ruido de tránsito que se comporte adecuadamente en Chile, tiene una mirada muy práctica y directa, y permitirá avanzar en mejores estudios de ruido ambiental, mientras se desarrollan estudios más detallados en pro de un modelo propio.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en cada ciudad y/o comuna para realizar el levantamiento de información necesaria para alimentar a los modelos fue muy similar, en cuanto a los tiempos de muestreo (15 minutos), en días laborales (lunes a viernes) y, además contemplaron la segregación de la composición del parque automotriz en vehículos livianos, pesados y motos. El muestreo fue realizado bajo las condiciones descritas en la norma ISO 1996-2:2007 [7]. Además, se escogieron los puntos de medición ubicados en distintos tipos de vías sin gradientes superiores a 5%.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de la metodología empleada en cada comuna o ciudad.

Tabla 1. Resumen metodología empleada en cada comuna o ciudad.

| Ciudad o Comuna | Cantidad mediciones | Duración mediciones (min) | Horario valle considerado | Horario punta considerado |
|---|---|---|---|---|
| Antofagasta | 102 | 15 | 9:00-18:00<br>20:00-21:00 | 7:00-9:00<br>18:00-20:00 |
| Providencia | 96 | 15 | 9:00-18:00<br>20:00-21:00 | 7:00-9:00<br>18:00-20:00 |
| Gran Santiago | 305 | 15 | 9:00-18:00<br>20:00-21:00 | 7:00-9:00<br>18:00-20:00 |
| Temuco y Padre Las Casas | 102 | 15 | 9:00-12:30<br>14:00-18:00 19:30-21:00 | - |
| Coquimbo y La Serena | 114 | 15 | 9:00-12:30<br>14:00-18:00 19:30-21:00 | - |
| Valdivia | 100 | 15 | 9:00-12:30<br>14:00-18:00 19:30-21:00 | 7:30-9:00<br>12:30-14:00 18:00-19:30 |
| Osorno | 92 | 15 | 9:30-12:30<br>15:30-19:00 | - |

## 3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO DE TRÁNSITO VEHICULAR

Existe una gran variedad de modelos de predicción de ruido de tránsito vehicular, que se caracterizan por utilizar distintas ecuaciones y variables para estimar los niveles de ruido en base a datos de flujo vehicular, velocidades de vehículos, entre otros. En el año 2001 Steele hizo un análisis comparativo entre los principales modelos de ruido de tránsito vehicular [8] y estudios

recientes han realizado una actualización del trabajo de Steele, pero incorporando modelos más modernos [9].

Dentro de los principales modelos de ruido de tránsito vehicular, se pueden destacar el modelo Norteamericano FHWA [10], el modelo Inglés CoRTN [11], el modelo Alemán RLS-90 [12], el modelo Japonés ASJ RTN-Model 2008 [13], el modelo de la Unión Europea HARMONOISE [14], los modelos Suizos SON ROAD [15], STL-86+ [16] y EMPA 97 [17], los modelos de Países Nórdicos STATENS PLANVERK 48 [18], STATENS PLANVERK 96 (desde ahora SP-96) [18] y NORD 2000 [19], el modelo francés NMPB-Routes-2008 [20] y el modelo Europeo CNOSSOS-EU [21].

Por otra parte, los modelos de predicción de ruido de tránsito vehicular se componen principalmente por dos etapas, una etapa de emisión y otra etapa de propagación. En este trabajo, se optó en abordar sólo la etapa de emisión debido a la cercanía de las mediciones respecto del flujo vehicular

Además, la elección final de los modelos a estudiar priorizó que la información necesaria para alimentar al modelo fuese simple, reducida y de fácil obtención durante las campañas de terreno, eliminando también a los modelos que trabajan con niveles de ruido por bandas.

Debido a lo anterior, los modelos elegidos para utilizar y comparar fueron el modelo Alemán RLS-90 (que ha dado buenos resultados en estudios previos en la ciudad de Santiago de Chile [22][23]), el modelo Suizo STL-86+ y el modelo de Países Nórdicos SP-96, que ambos han dado buenos resultados en ciudades del sur de Chile [5].

### 3.1. Modelo Alemán RLS-90

El nivel de emisión que se predice es un nivel de presión sonora de referencia, llamado LME (Level Mean Emission) y se obtiene aplicando todas las correcciones al nivel básico referido a una distancia de 25 metros desde el centro de la vía completa y medida a 4 metros de altura. Además el método asume una carretera con dos carriles, cada cual recibe la mitad del volumen de tráfico y trabaja con una fuente lineal ubicada en la mitad de los dos carriles a 0,5 metros de altura [12]. Las características del modelo de emisión en su formato sencillo son:

$$LME = L_{25} + C_{vel} + C_{pav} + C_{gradiente}$$
$$L_{25} = 37{,}3 + 10\log[Q(1 + 0{,}082P)]$$

Donde:
$L_{25}$ es el nivel sonoro base a 25 metros en dBA.
$Q$ es la densidad de tránsito vehicular (Vehículos por hora).
$P$ es el porcentaje de vehículos pesados (en %).

Por otra parte, el término de corrección para una velocidad distinta a la asumida por defecto (100 Km/h para ligeros y 80 km/h para pesados), es el siguiente:

$$C_{vel} = L_{ligeros} - 37{,}3 + 10\log\left[\frac{100 + (10^{0{,}1C})P}{100 + 8{,}23P}\right]$$

Donde:

$$L_{ligeros} = 27{,}8 + 10\left[1 + \left(0{,}02V_{ligeros}\right)^3\right]$$
$$L_{pesados} = 23{,}1 + 12{,}5\log\left(V_{pesados}\right)$$
$$C = L_{pesados} - L_{ligeros}$$

Donde:
$V_{ligeros}$ es la velocidad máxima permitida de vehículos livianos en el rango de 30 – 130 km/h.
$V_{pesados}$ es la velocidad máxima permitida de vehículos pesados en el rango de 30 – 80 km/h.
Además, el término de corrección por el tipo de carpeta de rodado $C_{pav}$, que genera un aumento o una disminución en el nivel de emisión, se muestra en la Tabla 2 y el término de corrección por gradiente está dado por:

$$C_{gradiente} = (0{,}6G) - 3, \text{ si } G > 5$$
$$C_{gradiente} = 0, \text{ si } G < 5$$

Donde $G$ es la pendiente del camino en %.

Tabla 2. Correcciones según tipo de carpeta modelo RLS-90. Fuente: [12]

| Tipo de superficie | Máxima velocidad permitida en Km/h | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 30 | 40 | >50 | >60 |
| Asfalto no ranurado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Concreto o asfalto rasurado | 1 | 1,5 | 2 | 2 |
| Superficie pedregosa con textura lisa | 2 | 2,5 | 3 | 3 |
| Superficie pedregosa con estructura rugosa | 3 | 4,5 | 6 | 6 |
| Hormigón con tratamiento escoba metal | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Asfalto hormigón sin grietas | 0 | 0 | 0 | -2 |
| Asfalto poroso con más de 15% de poros tipo 0/11 | 0 | 0 | 0 | -4 |
| Asfalto poroso con más de 15% de poros tipo 0/8 | 0 | 0 | 0 | -5 |

### 3.2. Modelo de Países Nórdicos SP-96

Este método es una actualización del modelo STATENS PLANVERK 48 [18]. El descriptor es el nivel sonoro continuo equivalente $LA_{eq}$ (dBA), evaluado para un periodo de 24 horas a una distancia de referencia de 10 metros y una altura de 1,5 metros.

$$LA_{eq} = 10\log\left[10^{\frac{LA_{eq,10m(ligeros)}}{10}} + 10^{\frac{LA_{eq,10m(pesados)}}{10}}\right]$$

Donde:

$$LA_{eq,10m(pesados)} = L_{AE,10m(pesados)} + 10\log\left(\frac{Q_p}{T}\right)$$
$$LA_{eq,10m(livianos)} = L_{AE,10m(livianos)} + 10\log\left(\frac{Q_l}{T}\right)$$
$$LA_{AE,10m(pesados)} = 81 + 30\log\left(\frac{V_p}{50}\right), \text{ para } 50 \text{ km/h} \leq V_p \leq 90 \text{ km/h}$$
$$LA_{AE,10m(pesados)} = 81, \text{ para } V_p < 50 \text{ km/h}$$
$$LA_{AE,10m(ligeros)} = 73{,}5 + 20\log\left(\frac{V_l}{50}\right), \text{ para } V_l \geq 40 \text{ km/h}$$
$$LA_{AE,10m(ligeros)} = 71, \text{ para } V_l < 40 \text{ km/h}$$

Siendo $Q_l$ y $Q_p$ el número de vehículos ligeros y pesados, respectivamente, durante el intervalo de tiempo $T$, en segundos.

### 3.3. Modelo Suizo STL-86+

La oficina federal del medio ambiente (FOEN) publicó el modelo STL-86 en 1997 [24]. Teniendo en cuenta una base de datos obtenido durante los ochenta, el método fue actualizado por la EMPA en 1995 y se transformó en el STL-86+ [16]. El nivel de emisión en dBA a una distancia de referencia de 1 metro y una altura de referencia de 1 metro está dado por [25]:

$$L_w = A + 10\log\left[\left(1+\left(\frac{v}{50}\right)^3\right)\cdot\left(1+B\cdot\varepsilon\cdot\left(1-\frac{v}{150}\right)\right)\right] + 10\log(N) + Coor$$

Donde A=43 y B=20 son dos constantes empíricas, $v$ es la velocidad media de todo el flujo vehicular, $\varepsilon$ es la razón entre el número de vehículos pesados y la cantidad total de vehículos, $N$ es el flujo total de vehículos por hora y $Coor$ es una corrección dependiendo del tipo de carpeta y la pendiente de la carretera.

### 3.4. Consideraciones y Factor de Corrección

Para realizar una comparación entre los niveles proyectados y medidos, se debe hacer una corrección asociada a la distancia y altura de referencia de los modelos, ya que los tres modelos entregan valores de emisión para distancias y alturas de referencia diferentes a las distancias y alturas utilizadas en terreno. Por lo anterior, se optó en utilizar un factor de atenuación basado en la atenuación por distancia de una fuente lineal sobre una superficie reflectante (divergencia cilíndrica) [26][27] y en el teorema de Pitágoras. El factor de corrección utilizado está dado por la siguiente ecuación [5]:

$$Factordecorrección = 10\log\left(\sqrt{\frac{d_{fr}^2+\left(h_r-h_f\right)^2}{d_{ref}^2+\left(h_{ref}-h_f\right)^2}}\right)$$

Donde:
$d_{fr}$ es la distancia de la fuente al receptor (donde se realizó la medición), $d_{ref}$ es la distancia de referencia de los modelos, $h_r$ es la altura donde se quiere evaluar el nivel (donde se realizó la medición), $h_{ref}$ es la altura de referencia de los modelos y $h_f$ es la altura de la fuente (todo en metros).

Por otra parte, los modelos utilizados se ajustaron para que pudieran incorporar las características locales de las superficies de rodado y clasificación del tipo de vehículo. Además, se ha supuesto que el flujo vehicular de una hora es cuatro veces el flujo de 15 minutos.

## 4. RESULTADOS

Teniendo en cuenta la cantidad de ciudades y/o comunas estudiadas, se optó en mostrar los resultados globales obtenidos de forma gráfica. En la Figura 1 se muestra los diferentes diagramas de cajas para los distintos modelos y en la Figura 2 se presenta los diagramas de dispersión y las estimaciones de regresión, tomando como variable dependiente el nivel medido y como variable independiente los niveles proyectados por cada modelo.

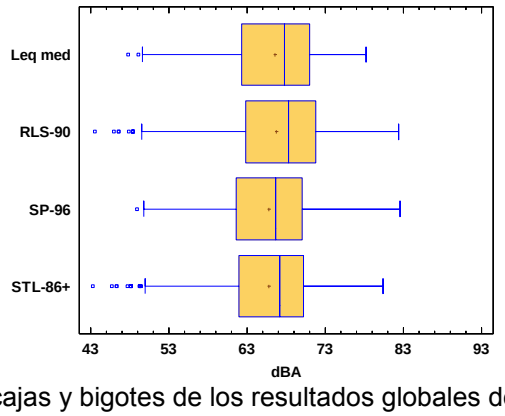
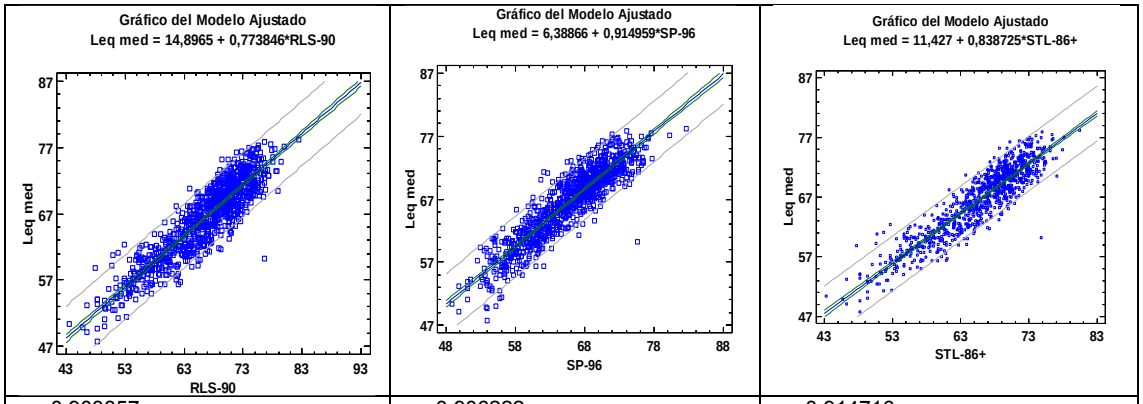



Figura 1. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados globales de todas las ciudades y/o comunas para los distintos modelos.




| | | |
|---|---|---|
| r = 0,903857<br>$R^2$ = 81,7%<br>$S_{yx}$ = 2,47 dBA | r = 0,906222<br>$R^2$ = 82,1%<br>$S_{yx}$ = 2,44 | r = 0,914716<br>$R^2$ = 83,7 %<br>$S_{yx}$ = 2,34 dBA |

Figura 2. Curva de dispersión de los resultados globales de todas las ciudades entre los niveles proyectados y observados para los distintos modelos.

Por otra parte, en la Tabla 3, se muestra un resumen de los datos obtenidos para cada ciudad y/o comuna y el resultado global de todos los estudios.

Tabla 3. Resumen resultados obtenidos en cada comuna o ciudad.

| Ciudad o Comuna | Modelo | Prom. Error Absoluto (dB(A)) | Desv. Estándar (dB(A)) | % Puntos < 1 dB(A) | % Puntos < 3 dB(A) | % Puntos Sobre-estimados | % Puntos Sub-estimados | Coeficiente R Pearson |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Antofagasta | RLS-90 | 2,56 | 4,74 | 28,4 | 62,7 | 82,4 | 17,6 | 0,88 |
| | SP-96 | 1,40 | 4,22 | 38,2 | 92,2 | 56,9 | 43,1 | 0,92 |
| | STL-86+ | 1,74 | 4,40 | 29,4 | 86,3 | 58,8 | 41,2 | 0,90 |
| Providencia | RLS-90 | 1,64 | 5,07 | 37,5 | 84,4 | 37,5 | 62,5 | 0,92 |
| | SP-96 | 1,75 | 4,79 | 36,5 | 80,2 | 45,8 | 54,2 | 0,90 |
| | STL-86+ | 1,80 | 4,80 | 31,3 | 78,1 | 28.1 | 71,9 | 0,92 |
| Gran Santiago | RLS-90 | 2,08 | 7,21 | 29,5 | 73,8 | 36,7 | 63,3 | 0,95 |
| | SP-96 | 2,24 | 6,56 | 27,5 | 71,8 | 32,8 | 67,2 | 0,92 |
| | STL-86+ | 2,32 | 6,78 | 23,0 | 69,5 | 21,3 | 78,7 | 0,95 |
| Temuco y Padre Las Casas | RLS-90 | 2,94 | 8,04 | 18,6 | 59,8 | 59,8 | 40,2 | 0,91 |
| | SP-96 | 2,15 | 5,54 | 25,5 | 69,6 | 37,3 | 62,7 | 0,94 |
| | STL-86+ | 2,41 | 7,51 | 21,6 | 66,7 | 49,0 | 51,0 | 0,92 |
| Coquimbo y La Serena | RLS-90 | 2,55 | 6,91 | 26,3 | 68,4 | 44,7 | 55,3 | 0,86 |
| | SP-96 | 2,23 | 5,24 | 33,3 | 72,8 | 28,1 | 71,9 | 0,86 |
| | STL-86+ | 2,53 | 6,45 | 21,9 | 71,1 | 33,3 | 66,7 | 0,87 |
| Valdivia | RLS-90 | 2,25 | 6,57 | 28,0 | 72,0 | 47,0 | 53,0 | 0,90 |
| | SP-96 | 2,62 | 4,29 | 23,0 | 56,0 | 27,0 | 73,0 | 0,93 |
| | STL-86+ | 2,24 | 6,09 | 30,0 | 70,0 | 29,0 | 71,0 | 0,91 |
| Osorno | RLS-90 | 2,50 | 4,15 | 17,4 | 42,4 | 94,6 | 5,4 | 0,88 |
| | SP-96 | 0,95 | 3,26 | 57,6 | 97,8 | 52,2 | 47,8 | 0,93 |
| | STL-86+ | 1,40 | 3,73 | 44,6 | 94,6 | 39,1 | 60,9 | 0,90 |
| Global | RLS-90 | 2,30 | 6,75 | 27,8 | 70,3 | 51,3 | 48,7 | 0,90 |
| | SP-96 | 2,04 | 5,72 | 31,2 | 75,1 | 38,4 | 61,6 | 0,91 |
| | STL-86+ | 2,14 | 6,30 | 26,7 | 74,5 | 35,9 | 64,1 | 0,91 |

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Analizando la Figura 1 se aprecia la similitud de la dispersión de los tres modelos y los niveles medidos, salvo algunos puntos outliers que llevan a la media hacia la izquierda. Por otra parte, en la Figura 2 se observa que los tres modelos presentan coeficiente de regresión altamente significativos, con errores estándar de medición similares variando entre 2,34 y 2,47 dBA. En relación al grado de explicación de cada modelo sobre el valor medido, el STL-86 alcanza un 83,7% de explicación, seguido por el SP-96 con un 82,1% y luego el RLS-90 con un 81,7%.

Respecto a la Tabla 3, se concluye que los tres modelos presentan coeficientes R Pearson muy similares, acercándose a una correlación positiva perfecta (valores muy cercanos a R=1). Además, respecto a la sobreestimación de niveles, el RLS-90 alcanza un 51,3%, seguido del SP-96 con un 38,4% y finalmente el STL-86+ con un 35,9%. Esto último resulta fundamental, desde el punto de vista de ingeniería, debido a la posibilidad de trabajar con un margen de seguridad, por ejemplo al momento de diseñar una medida de control.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis comparativo entre distintos modelos de ruido de tránsito vehicular y niveles de ruido medidos en distintas ciudades y comunas de Chile, estudiando 911 muestras.

De los resultados obtenidos, se aprecia que los tres modelos estudiados, RLS-90, SP-96 y STL-86+, presentan resultados muy similares, siendo el modelo STL-86+ el que entrega un mayor grado de explicación, lo que implica un menor error de estimación.

Por otra parte, las diferencia entre los errores que presenta cada modelo es poco significativa, considerando que varían entre 2,34 y 2,47 dBA. Por lo anterior, es importante considerar otras variables para seleccionar un modelo de ruido de tránsito para Chile. En este sentido, el modelo RLS-90 alcanza un mayor porcentaje de sobreestimación de niveles de ruido, siendo un factor a considerar para aplicaciones de ingeniería.

Además, se concluye que los tres modelos estudiados son válidos para hacer estudios en Chile, considerando un error promedio entre los niveles proyectados y reales de 3 dBA, lo cual es un margen razonable para el nivel de información con que se han trabajado en los modelos.

En virtud de los análisis realizados, un modelo de predicción de ruido de tránsito vehicular que entrega mejores estimaciones en las ciudades chilenas, es el modelo RLS-90

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se podría haber realizado sin la ayuda del Ministerio del Medio Ambiente de Chile, ya que facilitaron todos los datos de los estudios de ruido que se han elaborado en Chile.

## REFERENCIAS

[1] Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA. Elaboración de Mapas de Ruido mediante Software de Modelación, para Caso Piloto (Comunas de Antofagasta y Providencia) (Contrato N° 01-059/09). Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2009).
[2] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido Comuna De Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación Nº 1588-67-LE10. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2010).
[3] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración de Mapa de Ruido del Gran Santiago Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación Nº 608897-12-LE11. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile (2011).
[4] Ministerio del Medio Ambiente MMA. Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación. Ficha de Licitación Nº 608897-LP12. Proyecto en ejecución por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile; 2013-2015.
[5] Bastián, N.; Álvarez, J.P.; Moreno, F. Evaluación de Modelos de Predicción de Ruido de Tránsito Vehicular en Ciudades Pequeñas: Casos Ciudad de Valdivia y Osorno. IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2014. Valdivia, Chile (2014).

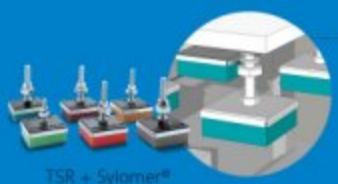
[6] Álvarez, J.; Suárez, E. Estudio Comparativo de Modelos de Predicción de Ruido de Tráfico Rodado Utilizando Mediciones en la Ciudad de Osorno. VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008. Buenos Aires, Argentina; 2008
[7] International Organization for Standardization. International Standard ISO 1996-2: 2007, *Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures.* International Organization for Standardization; 2007, Switzerland.
[8] Steele, C. A critical review of some traffic noise prediction models. Applied Acoustics. Volume 62, 2001, Pages 271-287 (2001).
[9] Garg, N.; Maji, S. A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. Environmental Impact Assessment Review. Volume 46, 2 March 2014, Pages 68-81 (2014).
[10] Barry, T.M.; Reagan, J.A. FHWA highway traffic noise prediction modelo, FHWA-RD-77-108. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research, Office of Environmental PolicyWashington, DC: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research, Office of Environmental Policy (1978).
[11] Department of Transport. Calculation of road traffic noise. Department of Transport, Welsh Office, HMSOU.K: Department of Transport, Welsh Office, HMSO (1998).
[12] Der Bundesminister Für Verkehr. Abteilung StraBenbau. Richtlinien für den Lärmschutz an StraBen RLS-90. Ausgabe (1990).
[13] Yamamoto, K. Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2008”: report of research committee on road traffic noise. Acoust Sci Technol 2010;31:1-55 (2010).
[14] Watts, G. Harmonoise prediction model for road traffic noise, PPR 034 (2005).
[15] Heutschi, K. Son Road: New Swiss road traffic noise model. Acta Acust United Acust 2004;90:548-54 (2004).
[16] INFORMATIONS CONCERNANT L’ORDONNANCE SUR LA PROTECTION CONTRE LE BRUIT (OPB) N°6 – Bruit du traffic routier: Correction applicable au modèle de calcul du traffic routier, in L’environnement pratique. 1995, Office fédéral de l’environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, 1995).
[17] Heutschi, K. SonRoad. Modèle de calcul du traffic routier. 2004, Office federal de l’environnement, des forêts et du paysage. P. 74. (2004)
[18] Cárdenas, J. Diseño y Desarrollo de una Herramienta Informática Simple para la Predicción de Ruido de Tráfico Vehicular en Vías Urbanas de la Ciudad de Valdivia-Chile. Trabajo presentado como parte de los requisitos para optar al grado de doctor en acústica, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España (2004).
[19] Kragh, J.; Svein, A.; Jonasson, H.G. Nordic environmental noise prediction methods. Nord 2000, summary report. Denmark: DELTA (2002).
[20] Dutilleux, G.; Defrance, J.; Ecotiére, D.; Gauvreau, B.; Bérengier, M.; Besnard, F, et al. NMPB-Routes 2008: the revision of the French method for road traffic noise prediction. Acta Acust United Acust 2010;96:1-11 (2010).
[21] Kephalopoulos, S.; Paviotti, M.; Anfosso-Lédée, F. Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU); 2012;1-180.
[22] Suárez, E.; Barros, J.L. Traffic Noise Mapping of the City of Santiago de Chile. Science of the Total Environment. Volumes 466-467, 1 January 2014, Pages 539-546 (2014).
[23] Dintrans, A.; Préndez, M. A method of assessing measures to reduce road traffic noise: A case study in Santiago, Chile. Applied Acoustics 2013;74:1486-1491 (2013).
[24] EMPA. Modèle de calcul de bruit du trafic routier pour ordinateur – Les cahiers de l’environnement nº60. 1987, Office fédéral de la protection de l’environnement (1987).
[25] Aballea, F.E.; Rene, P.F. Uodate of the Swiss Source Model for Road Traffic Noise. The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration ICSV 16, Kraków, Poland (2009).
[26] Gerges, S.N.Y.; Arenas, J.P. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones, 2da Ed., NR Editora, Florianópolis (2010).
[27] Möser, M.; Barros, J.L. Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones. 2da Ed., Springer-VerlagBerlin Heidelberg (2009).

# Desde 1969 fabricando **soluciones** para cada problema de vibración en acústica de construcción

AMC MECANOCAUCHO



FZ + Sylomer®

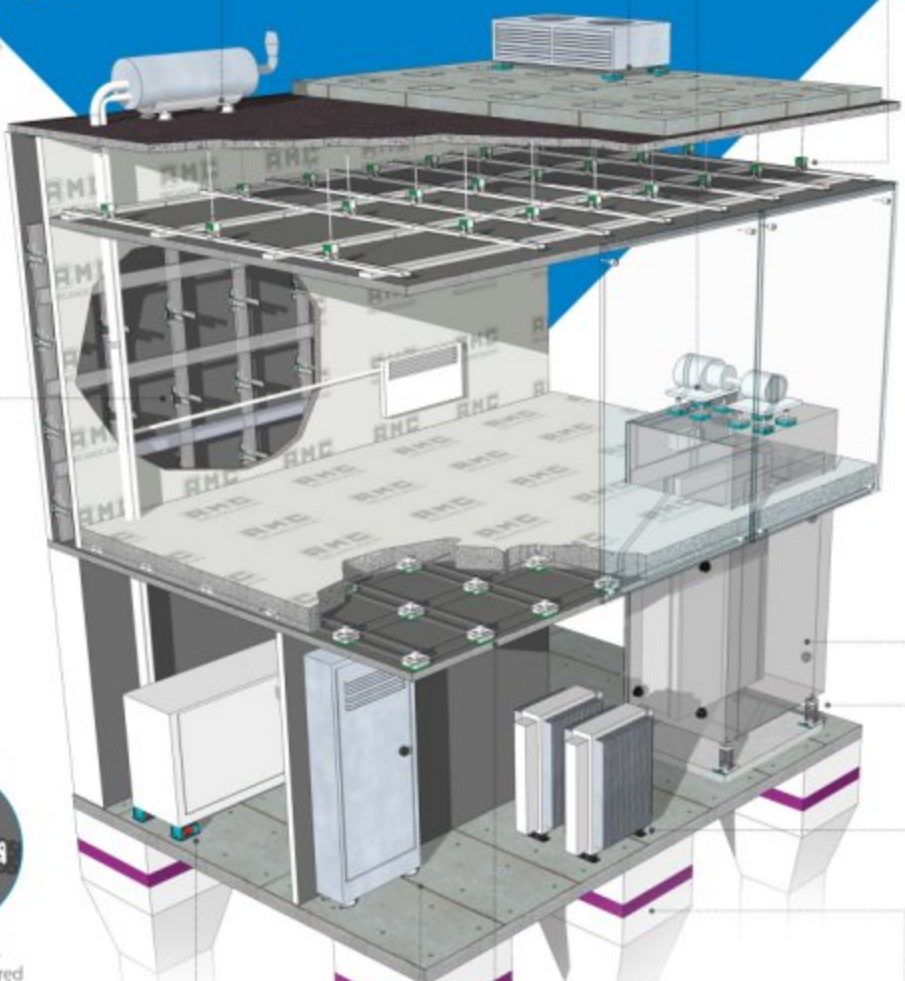


TSR + Sylomer®





Aislamiento de vibraciones de techo





SRB & SRS + Sylomer®



Gran Akustik



Springtec & Springtec Super



Akustik + Sylomer®



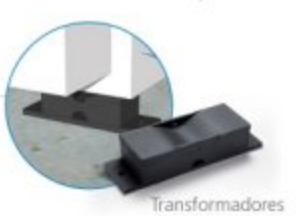
SCB



Vibrabsorber + Sylomer®



Aislamiento de vibraciones de pared



Transformadores



Suspension elástica de edificios con Sylomer®



EP+Sylomer®



EP



4 AMC Antisísmico +Sylomer®

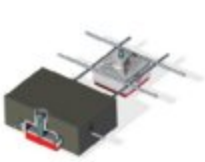


BSB



Aislamiento de vibraciones de suelo





FZH + Sylomer®




**Aplicaciones Mecánicas del Caucho, S.A.**
Industrialdea Parc 35 A.
E-20.159 Asteasu. Spain.
Tel.: + 34 943 69 61 02
Fax: + 34 943 69 62 19
e-mail: ventras@amcsa.es
www.mecanocaucho.com
www.akustik.com




TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ANÁLISIS DEL NIVEL DE RUIDO Y LA DOSIS DE EXPOSICIÓN EN ACTIVIDADES DE OCIO

PACS: 43.64

Guillem Cánovas, Andrea, Martín Bravo Mª Ángeles [1]; Tarrero Fernández Ana Isabel[2]
Escuela de Ingenierías Industriales, C/ Francisco Mendizábal nº 1, 47014 Valladolid, España
Teléfono 983 423 500, [1] maruchi@eii.uva.es [2] anatarrero@eii.uva.es

## ABSTRACT

The noise from leisure activities is one of the acoustic pollutants that brings more discomfort in our present society. The objective of this paper is analyzes the noise levels and the dosage that the persons are exposed in different places. The results show that in some cases the levels are very high, even higher than 95 dBA, however, generally youth people are confortable in them. Also there has been a audiometric study which indicates that around 25% of young people considered have some hearing problem.

## RESUMEN

El ruido derivado de las actividades de ocio es uno de los contaminantes acústicos que más molestias ocasiona en la sociedad actual. El objetivo de este trabajo es analizar los niveles de ruido y la dosis a la que están expuestas las personas en diferentes locales. Para ello se han medido niveles sonoros en distintos ambientes (cafeterías, discotecas, pubs …), y se ha preguntado sobre la percepción de molestia por ruido en ellos. Los resultados muestran que en algunos casos los niveles son muy elevados, incluso superiores a los 95 dBA, sin embargo, en general los jóvenes se encuentran a gusto en ellos. También se ha realizado un estudio audiométrico que manifiesta que entorno al 25% de los jóvenes considerados presentan algún problema auditivo.

## I- INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

A lo largo de nuestra vida estamos expuestos a una gran cantidad de sonidos de diferentes niveles. El tráfico, las obras, los espectáculos, los gritos… producen niveles elevados de contaminación acústica a los que parece que no estamos acostumbrados [1] [2]. Sin embargo, y a pesar de formar parte de nuestra vida cotidiana, el ruido es uno de los problemas

ambientales más relevantes. Cada vez más las personas padecen problemas de audición debido a la contaminación acústica, sin ser plenamente conscientes de ello [2].
Sin embargo, el grupo etario con más riesgo de terminar con sordera es el de los jóvenes [3], en los que se está provocando un aumento significativo de pérdida de audición que subestiman porque no son conscientes de las consecuencias del nivel de ruido al que están expuestos [4].
La Organización Mundial de la Salud (OMS) califica al ruido como la primera causa de molestia ambiental en países desarrollados, y acaba de declarar en un informe que un 50% de las personas de entre 12 y 35 años, están expuestas a '' niveles peligrosos'' de sonido por la utilización de dispositivos de audio, y alrededor de un 40% está en riesgo de exponerse a ''niveles potencialmente dañinos'' de ruido en lugares de ocio [3] [5]. Esto es tal, que se estima que alrededor de 1.100 millones de adolescentes y adultos jóvenes, están en riesgo de pérdidas importantes en la audición debido a estos hábitos [5]. Hay una preferencia por parte de los jóvenes, que buscan principalmente ambientes sonoros elevados y el resultado es un grave riesgo de pérdida auditiva irreversible [6].
Pero no sólo en estos lugares se emiten sonidos muy elevados, actualmente en centros comerciales y tiendas también puede haber contaminación acústica. Así lo determinó la Organización de Consumidores y Usuarios, OCU, en Octubre del 2010 [7].
La Organización Mundial de la Salud establece como criterio que sólo se puede asistir a conciertos a 100 dB durante 4 horas 4 veces por año, mientras que en una discoteca se puede llegar a tener mas de 105 dB y los jóvenes asisten una media de 4 horas, cerca de 50 veces por año, suponiendo que asisten cada semana [8].

Por todo ello, y siendo el ruido derivado de las actividades de ocio uno de los contaminantes más importantes de la sociedad actual, los objetivos principales de esta comunicación son: determinar los niveles sonoros que existen en los diferentes ambientes que frecuentan los jóvenes, sobre todo, los relacionados con las zonas de ocio. Por otra parte, también se tratará de obtener información acerca de la opinión que tienen los jóvenes sobre el ruido en estos ambientes. Por último, se analizarán las lesiones auditivas de una muestra de jóvenes para corroborar si la situación es tan alarmante como indican diversos estudios como los llevados a cabo por la OMS. Otros estudios realizados previamente a este trabajo se recogen en [9,10,11 y 12].

## 2 – METODOLOGÍA

Para conocer el nivel de ruido al que están expuestos los usuarios y los trabajadores en las distintas zonas de ocio se han realizado medidas del nivel de ruido, con el dosímetro 4442 de B&K en varios locales de ocio (bares, discotecas, cafeterías, cines…), en las ciudades de Valladolid, Madrid y Amsterdam. En total se han llevado a cabo 127 medidas, que corresponden a 971 minutos de grabación. En la tabla 1 se pueden ver las medidas que se han tomado en los distintos ambientes, y el tiempo que han durado.

Tabla 1: nº de medidas y tiempo total de medida en cada una de las actividades estudiadas

| | Transportes | Cines | Museos | Boleras | Karaokes | Tiendas | C. Comerciales |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medidas | 7 | 6 | 8 | 2 | 2 | 9 | 4 |
| Duración (min) | 23 | 98 | 28 | 17 | 10 | 24 | 22 |

| | Restaurantes | C. Rápida | Tabernas | Cafeterías | Bares | Pubs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medidas | 10 | 4 | 5 | 18 | 25 | 27 |
| Duración (min) | 146 | 60 | 65 | 149 | 199 | 130 |

Para conocer la opinión sobre la molestia del ruido de los que asisten a estas actividades se ha pasado una encuesta en las mismas zonas de ocio donde se han realizado las medidas.
En total se recogieron 323 encuestas, de las cuales el 80% corresponden a personas menores de 35 años. El número de encuestas realizadas en cada zona se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: nº de encuestas realizadas en cada uno de los ambientes estudiados

| Nº Encuestas | Boleras | Karaokes | Tiendas | Restaurantes | C. Rápida | Tabernas | Cafeterías | Bares | Pubs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Totales | 10 | 10 | 27 | 23 | 13 | 10 | 43 | 80 | 107 |
| <35 (80%) | 8 | 7 | 13 | 15 | 11 | 4 | 30 | 71 | 99 |
| >35 (20%) | 2 | 3 | 14 | 18 | 2 | 6 | 13 | 9 | 8 |

La encuesta consta de cuatro preguntas breves sobre la percepción personal del nivel sonoro, así como del confort acústico en el lugar en cuestión. Las preguntas son las siguientes:
1.- Nivel sonoro del recinto según su opinión personal.
2.- Confort acústico en el recinto según su opinión personal.
3.- ¿En qué medida puede mantener una conversación adecuada en este recinto?
4.- ¿Se encuentra usted cómodo en este ambiente respecto al nivel de ruido?
La escala de respuesta utilizada ha sido del 1 al 10 y para simplificar su análisis se agruparon las respuestas en 5 grupos (1-2 muy bajo, 3-4 bajo, 5-6 medio, 7-8 alto y 9-10 muy alto).

Por último hemos tenido acceso a los resultados de un estudio audiométrico realizado a 75 personas jóvenes, con edades comprendidas entre los 20 y los 35 años, lo que nos ha permitido tener información sobre su estado auditivo.

Puesto que las medidas se han realizado en las ciudades de Valladolid, Madrid y Amsterdam, para analizar si los ambientes estudiados cumplen con la normativa vigente, se ha consultado la normativa a nivel Europeo, Nacional, Regional y Local, en cuanto a control y gestión de ruido [13-15] y en cuanto a protección de los trabajadores frente a la contaminación acústica [16,17].
En cuanto a control y gestión de ruido cabe destacar que en [15] se indica que en el interior de cualquier espacio, abierto o cerrado, destinado a reuniones, espectáculos o audiciones musicales, como discotecas, salas de fiesta y similares, se prohíbe la superación de un nivel de presión acústica de 95 dB(A). Además, será preciso, cuando se haya autorizado un valor de emisión que superen los 90 dB(A), la colocación en el acceso o accesos del referido espacio de un cartel con la siguiente leyenda «El acceso y permanencia continuados en este recinto puede producir daños permanentes en el oído, por superarse en su interior un nivel de presión sonora de 90 dB(A)».
En cuanto a la protección de los trabajadores contra el ruido, el Real Decreto 286/2006 [17] indica los valores límites de exposición (Laeq,d=87 dBA y Lpico=140 dBC) y los valores que dan lugar a una acción (valores superiores: Laeq,d=85 dBA y Lpico=137 dBC ; valores inferiores: Laeq,d=80 dBA y Lpico=135 dBC).

## 3 - RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en las tres ciudades se han analizan de forma conjunta, tanto para las medidas como para la encuesta, ya que se ha observado que son muy similares.

### 3.1 - Resultados más significativos de las medidas realizadas

Los ambientes que cumplen con la normativa vigente en cuando a control y gestión de ruido y seguridad laboral son los transportes públicos, tiendas, cines, museos, boleras, comedores y cafeterías.

Los ambientes que no cumplen con la normativa son los bares, pubs, y karaokes, indicando que son estos lugares los más ruidosos y los más frecuentados por los jóvenes. Por lo tanto nos vamos a centrar en ellos, mostrando principalmente los resultados obtenidos en los pubs por ser el ambiente que mayores niveles presenta. Las personas que acuden a estos lugares se encuentran sometidas a un nivel medio de presión sonora de 88,5+3,7 dBA en Bares, 92,8+2,3 dBA en Pubs, y 89,5+1,7 dBA en Karaokes. Todos los que superan los 90 dBA se comprobó que tienen la placa informativa. La figura 1 muestra los niveles de presión sonora medidos en los pubs, en ella también se indica el límite máximo permitido de 95 dBA y se puede observar que el 50% emite por encima de los 95 dBA.

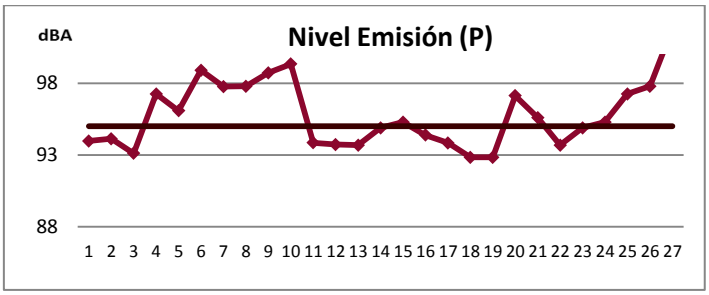



Figura 1: Nivel medido en cada uno de los 27 pubs estudiados

En cuanto a la dosis de ruido que recibe una persona en esos ambientes, también se han obtenido valores muy altos. Permaneciendo 4 h se recibe el 100% de la dosis máxima permitida en el 40% de los bares y en el 100% de los pubs y karaokes analizados. En la figura 2 se representa la dosis recibida para 8, 4 y 2 horas en cada uno de los pubs en los que se ha medido. Además, tal como se indica en el citado Real Decreto, a partir de 85 dBA los trabajadores deberían llevar protecciones auditivas para atenuar el ruido, pero se ha comprobado que ninguno de ellos la llevaba, ni siquiera se les han proporcionado, tal y como han indicado los trabajadores a los que se ha entrevistado.

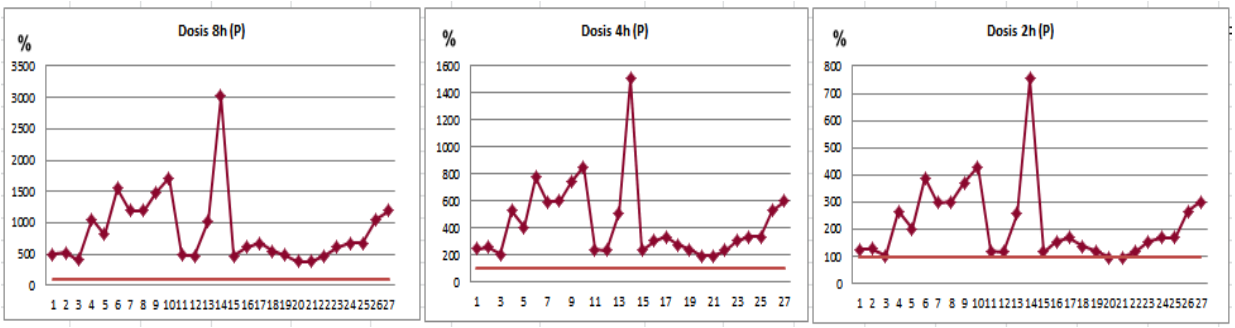



Figura 2: Dosis de ruido que se recibe en cada uno de los Pubs estudiados durante 8, 4, y 2 horas

En el caso de los pubs se ha calculado el nivel de exposición personal semanal para los trabajadores, ya que la jornada laboral puede ser variable, se representa en la figura 3 indicando también en ella el nivel máximo de 87 dBA, superándose en todos los casos como se puede observar.

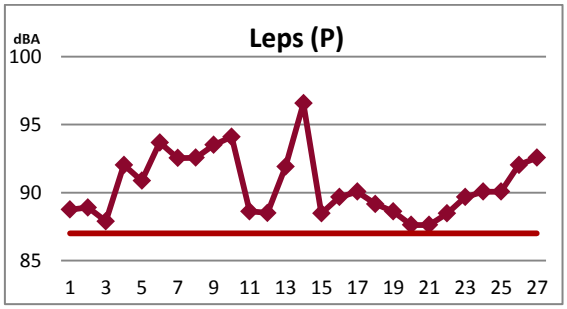



Figura 3: Nivel de exposición personal semanal en cada uno de los Pubs estudiados

Estos resultados muestran que desde el punto de vista de la seguridad laboral, muchas de estas actividades no respetan la normativa, ya que una persona que tenga que trabajar en ellas está sometida al mismo nivel de ruido que un cliente, pero durante un tiempo más prolongado.

### 3. 2. Resultados de las encuestas

En la tabla 3 se recogen los resultados de cada una de las preguntas de la encuesta de la muestra total. También se ha analizado el grupo de encuestados menores de 35 años y los resultados son muy similares.

Tabla 3: Resultados de cada una de las preguntas de la encuesta

| | Resultados generales de la encuesta | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ambiente** | **P1** | **P2** | **P3** | **P4** |
| Restaurantes | MEDIO-BAJO | ADECUADO | NORMAL | CONFORTABLE |
| Bares | ALTO | ACEPTABLE | NORMAL | ACEPTABLE |
| Pubs | ALTO-MUY ALTO | ADECUADO | MALA | CONFORTABLE |
| Cafeterías | MEDIO-BAJO | ADECUADO | BUENA | CONFORTABLE |
| Tiendas | MEDIO | ADECUADO | BUENA-MUY BUENA | ACEPTABLE |
| Boleras | MEDIO | ACEPTABLE | BUENA | CONFORTABLE |
| Karaokes | MEDIO | ADECUADO | NORMAL | CONFORTABLE |

*LEYENDA*

1.- **P1**: Nivel de ruido.
2.- **P2:** Confort Acústico.
3.- **P3**: Medida en que se puede mantener una conversación adecuada.
4.- **P4:** Nivel de comodidad respecto del ruido.

OPINIÓN FAVORABLE
OPINIÓN DESFAVORABLE

Los resultados muestran que las personas encuestadas consideran ambientes ruidosos únicamente a los Bares y los Pubs, lugares donde, a pesar de ser ruidosos, se sienten cómodos respecto al ruido, aunque opinan que no se puede entablar una conversación adecuada fácilmente, como respondieron en el caso de los Pubs. Las zonas de ocio que han sido consideradas como poco ruidosas han sido las cafeterías y los comedores, considerando que el confort acústico de ambos es aceptable, y que se puede mantener una conversación adecuada fácilmente. El resto de zonas han sido catalogadas como normales, ya que los usuarios encuestados no las consideran ni mucho ni poco ruidosas. Estas zonas engloban a las tiendas, boleras y karaokes.

### 3.3 – Relación entre los niveles medidos y las encuestas

Si se relacionan los niveles sonoros medidos con los resultados de la encuesta, se obtiene que en los pubs el nivel de presión sonora, cuyo valor medio es de 95,8 dBA, es considerado alto por el 91% de los encuestados aunque, a pesar de ser conscientes del elevado nivel de ruido en estos recintos, sólo el 12% ha indicado sentirse incomodo respecto al ruido, y unicamente el 13% lo ha considerado acústicamente no confortable. Además, un 86% ha indicado que no se puede mantener correctamente una conversación en estos lugares.

Respecto a los bares, en los que se ha medido un nivel de presión sonora de 88,5 dBA de valor medio, el 75% de los encuestados es consciente de este hecho, pero únicamente un 30% considera que en los bares hay un mal confort acústico, y sólo un 15% afirma no sentirse cómodo respecto al ruido. El 22% de los encuestados además afirma que en estos ambientes no es posible mantener una conversación de manera adecuada.

Por último destacar que aunque solamente se ha medido en dos karaokes, y en ellos se han realizado diez encuestas por lo que los resultados obtenidos pueden no ser muy significativos, es importante destacarlos ya que el nivel medio medido ha sido de 89,5 dBA y ninguno de los encuestados considera este nivel elevado, tampoco se encuentran incómodos respecto al ruido, ni opinan que el confort acústico en ellos sea malo. Sólo un 30% de los encuestados afirmó que era imposible tener una conversación adecuada en dicho ambiente.

### 3.4 - Resultados del estudio audiométrico

Del análisis de los resultados de las audiometrías que nos han facilitado se ha obtenido que el 27% de los jóvenes presenta signos de problemas auditivos como se muestra en la figura, de ellos el 5% presentó hipoacusia perceptiva bilateral y el 22% hipoacusia perceptiva unilateral (el 11% en el oído derecho y el otro 11% en el oído izquierdo).

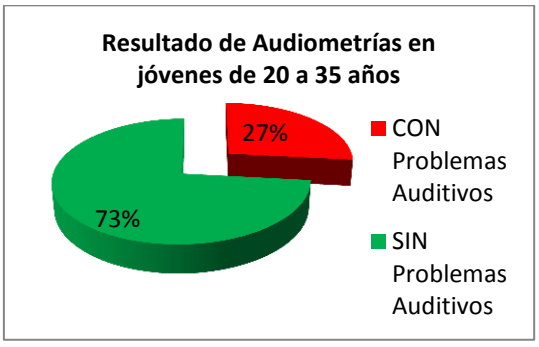



Figura 4. Resultados de la audiometría

## 4 - CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas de cada una de las tres vías de recogida de información, es decir, de las medidas y su análisis en los ambientes estudiados, del análisis de resultados de las encuestas realizadas, de la relación entre ambos y del estudio audiométrico.

a) Conclusiones de la medición de los niveles de ruido en distintas zonas de ocio

- Los ambientes que cumplen con la normativa vigente son los transportes públicos, tiendas, cines, museos, boleras, comedores y cafeterías. Las personas que frecuenten o trabajen en estas actividades, no tendrán por qué sufrir lesiones auditivas permanentes, aunque, desde el punto de vista del confort acústico los valores registrados pueden considerarse elevados.

- Los ambientes que no cumplen la normativa son los bares, pubs, y karaokes, lugares muy ruidosos frecuentados por los jóvenes. Los niveles extremadamente elevados de estos lugares pueden causar lesiones auditivas permanentes tanto a los trabajadores

como a los usuarios. De estos tres ambientes, el 50% de los Pubs, superan el valor de 95 dBA, y el 100% de los pubs y el 40% de los bares superan los niveles de emisión de 90 dBA.

- En cuanto a la salud del trabajador, considerando la jornada laboral en bares y pubs de cuatro horas el 92% de los pubs y el 13% de los bares superan el valor máximo permitido, lo cual es un resultado alarmante desde el punto de vista de la higiene y seguridad de los trabajadores.

b) Conclusiones de las encuestas realizadas

- En los bares analizados, el 75% de los encuestados consideran que el nivel sonoro es alto o muy alto, bajando al 68% si solo se considera a los menores de 35 años. Respecto al confort acústico, sólo un 15% de los encuestados indica sentirse incómodo. Por último, destacar que sólo el 22% opina que no se puede mantener una conversación adecuadamente.

- Los pubs son considerados ambientes con un nivel de ruido alto o muy alto para el 91% de los encuestados. Sin embargo el 88% de los encuestados consideran los pubs acústicamente adecuados incluso el 48% lo califica como bueno desde el punto de vista acústico. Sólo un 14% se encuentra incómodo, a pesar de que el 86% de los encuestados afirma que no se puede mantener una conversación adecuadamente.

c) Conclusiones del estudio audiométrico

- El estudio pone de manifiesto que el 27% de los jóvenes analizados tiene problemas auditivos que en el caso de España serían 2,7 millones de jóvenes cifra muy elevada y alarmante.

Finalmente y de manera general, podemos afirmar que los ambientes de ocio más ruidosos son los pubs, bares y karaokes, siendo estos frecuentados en su mayoría por personal menores de 35 años, que aun siendo conscientes del elevado nivel de ruido en ellos se sienten cómodos al respecto. Un alto porcentaje de los jóvenes analizados presenta daños auditivos irreversibles, por lo que el ruido es un riesgo real para la salud de los jóvenes. El reto que tenemos es la formación y concienciación social para evitar daños irreversibles en la audición y molestia a la comunidad. Es un problema de responsabilidad social

**BIBLIOGRAFÍA**

[1] http://www.costalerena.com/2011/04/el-ruido-puede-matar.html (Mayo 2015)
[2] http://www.viviendoelsonido.com/prevencion/ver/5/prevencion/ruido/sociedad (Mayo 2015)
[3] http://www.infonews.com/nota/187808/los-ruidos-que-estan-dejando-sordos-a-los-jovenes (Mayo 2015)
[4] http://www.viviendoelsonido.com/prevencion/ver/6/prevencion/ruido/jovenes- y-audicion (Mayo 2015)
[5]http://www.abc.es/salud/noticias/20150302/abci-sordera-musica-auriculares-201503021237.html (Mayo 2015)
[6] http://www.lagacetadesalamanca.es/salud/2015/03/05/problemas- audicion-jovenes/138809.html (Mayo 2015)
[7] http://www.ocu.org/organizacion/prensa/notas-de-prensa/2010/demasiado- ruido-en-centros-comerciales513114 (Mayo 2015)

[8] Alteraciones en el habla y en la audición en jóvenes universitarios.-- Escuela de Fonoaudiología. Facultad de Ciencias Médicas. U.N.R.: Rosario; 2002.
[9] Deterioro auditivo por exposición a música en adolescentes argentinos. 42º Congreso español de acústica. Encuentro Ibérico de acústica. Tecniacústica Cáceres 2011.
[10] Diagnóstico de la exposición y efecto del ruido en la población que frecuenta establecimientos nocturnos en la ciudad de Medellín. Universidad de Medellín, Nov. 2007.
[11] http://www.ocu.org/organizacion/prensa/notas-de-prensa/2010/demasiado- ruido-en-centros-comerciales513114 (*Mayo 2015)*
[12] Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir /Psicólogos advierten del abuso de los mp3 en adolescentes (22/05/12).
[13] Directiva 2002/49/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental
[14] Ley 37/2003 de Ruido del 17 de noviembre, BOE 276
[15] Ordenanza sobre ruidos y vibraciones de Valladolid aprobada el 7 de Mayo de 2013, y http://www.muyinteresante.es/salud/articulo/la-musica-alta-aumenta-el- consumo-de-alcohol.endría (Mayo 2015)
[16] Directiva 2003/10/CE de 6 de Febrero del 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido).
[17] Real Decreto 286/2006, de 10 de Marzo de 2006, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# NACIONAL 332 A SU PASO POR OLIVA: COMPARATIVA DE 1999 Y 2015

**PACS: 43.50Lj**

Del Rey Tormos, Romina[1]; Alba Fernández, Jesús[1]; Bertó Carbó, Laura[1]; Ramis Soriano, Jaime[2],
[1]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.
Escuela Politécnica Superior de Gandía; Universitat Politècnica de València.
C/ Paraninfo nº1, Grau de Gandia 46730 (Valencia). España.
E-mail: lauberca@upv.es, jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es
[2]Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig S/N – 03690 San Vicente del Raspeig - Alicante
E-mail: jramis@ua.es

**ABSTRACT**
The town of Oliva, in Valencia, is under the effect of the traffic noise generated by the Nacional Road, N-332, which go through the town. Nowadays, there is no free alternative route that prevents the traffic of vehicles, light and heavy, cross daily this town. In this paper a summary of the latest measurements and predictions made in the months of May and June 2015 is shown. This study was requested by the local government. In addition, we have previous data about the behavior of this infrastructure. These data were taken during 1999. Then, we can compare data registered during this study with data obtained 16 years ago.

Keywords: Noise Pollution, Road Traffic Noise, Environmental Noise

**RESUMEN**
La población de Oliva sufre los problemas de ruidos del tráfico que genera la N332. No existe todavía una vía alternativa gratuita que evite que la circulación de vehículos, ligeros y pesados, atraviese día a día esta población. En este trabajo se muestra el resumen de las últimas mediciones y predicciones realizadas en los meses de mayo y junio de 2015, este trabajo ha sido realizado a petición del Ayuntamiento de Oliva. Además, ya se tenía la experiencia previa de mediciones en la N332 en el año 1999, y se ha podido comparar tanto caudales de tráfico como niveles de ruido.

Palabras clave: Contaminación Acústica, Ruido de Tráfico Rodado, Ruido Ambiental.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO.

El presente trabajo se enmarca dentro del campo de la acústica ambiental. Actualmente, la contaminación acústica constituye uno de los principales problemas medioambientales en Europa. Los ciudadanos están sometidos a elevados niveles de ruido y vibraciones, de manera diaria, que generan efectos nocivos importantes sobre la salud y la calidad de vida de la población. El presente trabajo se centra en el estudio y evaluación de los niveles de ruido generados por una infraestructura de tráfico rodado (N-332) a su paso por el casco urbano de la población de Oliva, en la provincia de Valencia (España). Esta población sufre las consecuencias del ruido generado por el tráfico rodado desde hace más de 15 años y, a día de hoy, no existe una vía alternativa gratuita que evite que la circulación de vehículos, ligeros y pesados, atraviese día a día esta población. En este trabajo se muestra el resumen de las últimas mediciones y predicciones realizadas en los meses de mayo y junio de 2015 y se comparan los datos con registros tomados en el año 1999 para la misma infraestructura.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la compatibilidad de la Nacional 332 a su paso por el casco urbano del municipio de Oliva, Valencia, con los objetivos de calidad acústica planteados en el RD 1367/2007 [1], de 19 de octubre por el que se desarrolla la Ley 37/2003 [2], de 17 de Noviembre, del ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas y comparar los niveles de ruido registrados en este estudio con los que se obtuvieron en el año 1999 para esta misma infraestructura. El objetivo secundario, consecuencia del objetivo principal, es plantear, en caso de ser necesario, medidas correctoras que disminuyan los niveles de ruido registrados hasta alcanzar los criterios de calidad exigidos.

## TRABAJO DE CAMPO

Como primera parte del estudio se realiza el trabajo de campo, consistente en la identificación de las principales fuentes de ruido en la zona a estudio, el establecimiento de las posiciones de medida y la toma de registros.

### Principales Fuentes De Ruido

Se identifica la infraestructura a estudio, N-332 a su paso por Oliva, como la principal fuente de ruido y se divide en cuatro tramos. En función de ello se distribuyen las posiciones de medida de forma adecuada para registrar con la mayor precisión posible el nivel sonoro generado por esta fuente. En la Figura. 1 se puede ver un detalle de la infraestructura a su paso por la población de Oliva y su división en 4 tramos.

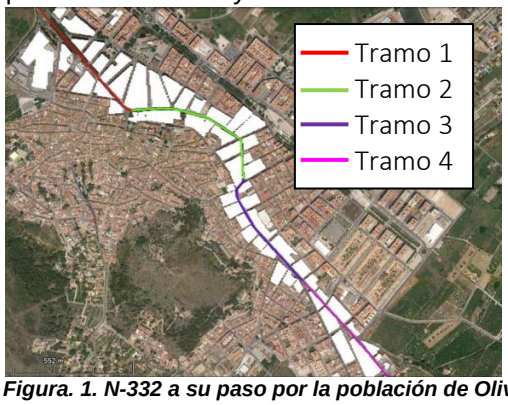



***Figura. 1. N-332 a su paso por la población de Oliva.***

Tramo1: Alberga, mayoritariamente, el tráfico de entrada y salida de la población por la zona Norte.
Tramo2: Alberga, además, el tráfico que proviene del propio casco urbano de la población, previo desvío a la zona de Playa.
Tramo3: Elimina el tráfico que se ha desviado a la zona de la Playa pero todavía contiene el que se dirige a la salida del municipio por la zona Sur.
Tramo4: Tras el desvío del tráfico a la población de Pego, contiene el flujo de salida/entrada por la zona Sur.

El flujo de tráfico en cada uno de estos tramos de la infraestructura se obtiene de conteo "in situ" durante el trabajo de campo (ver la Figura. 2).

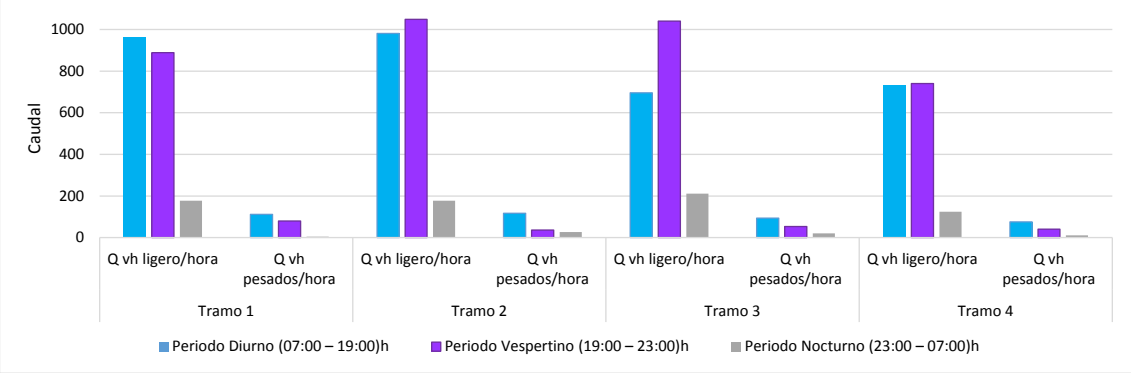



***Figura. 2. Flujo de tráfico en la N-332 a su paso por la población de oliva, obtenido de conteo "in situ" durante el trabajo de campo.***

Podemos observar que es durante los periodos diurno y vespertino cuanto más caudal de tráfico se registra. El tramo con menor caudal de tráfico es el tramo 4 de entrada/salida a la población por la zona Sur. Por tanto, será el tramo de infraestructura con menor afección de ruido por tráfico rodado.

**Posiciones De Medida Para La Toma De Registros.**

*Las mediciones de campo consisten en la evaluación del nivel de presión sonora, $L_d$, $L_e$ o $L_n$, generado por el tráfico rodado que circula por la N-332, en tres periodos de evaluación distintos; periodo diurno (07:00 – 19:00h), periodo vespertino (19:00 – 23:00h) y periodo nocturno (23:00 – 07:00h). Estas mediciones se realizan mediante el establecimiento de 4 posiciones de micrófono definidas como, Punto 1, Punto 2, Punto 3 y Punto 4 (ver Figura. 3 y* **Tabla 1).**

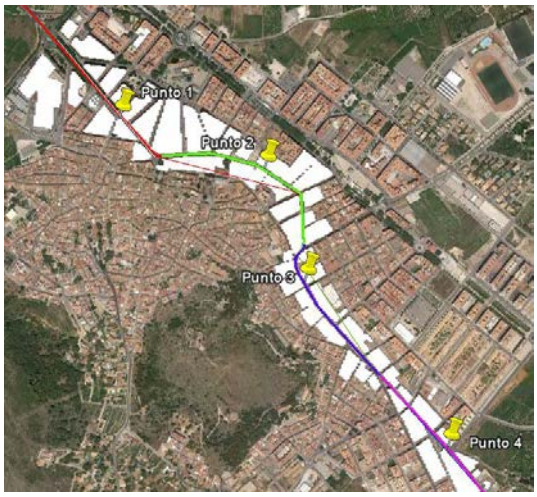



***Figura. 3. Posiciones de micrófono establecidas para la toma de datos.***

| | Coordenadas UTM | |
|---|---|---|
| Punto 1 | 749349.00 m E | 4312094.00 m N |
| Punto 2 | 749763.00 m E | 4311965.00 m N |
| Punto 3 | 749886.00 m E | 4311652.00 m N |
| Punto 4 | 750307.00 m E | 4311200.00 m N |

***Tabla 1. Coordenadas geográficas correspondientes a cada posición de micrófono establecida.***

El micrófono, en cada punto de medida, se sitúa a una altura de 1.5m sobre el nivel del suelo y a 1.2m de cualquier fachada o paramento que pueda introducir distorsión por reflexiones en la medida. En cada punto se realizan tres series de mediciones del $L_{Aeq,Ti}$ , con tres mediciones en cada serie, y para cada periodo de evaluación, esto es 9 registros en cada punto y para cada periodo de evaluación, Día ($L_d$), Tarde ($L_e$) y Noche ($L_n$). El tiempo de duración de cada medida es de 5 minutos (Ti = 300s), con intervalos temporales mínimos de 5 minutos entre cada una de las series. Esta decisión se ha tomado teniendo en cuenta la estabilización previa por ciclos de semáforo en cada tramo y lo indicado en el RD 1367/2007 [1]. La evaluación del nivel sonoro

en el periodo temporal de evaluación se determinará a partir de los valores de los índices $L_{Aeq,Ti}$ de cada una de las medidas realizadas, aplicando la siguiente expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{L_{Aeq,Ti}/10}\right) \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde:
T, es el tiempo en segundos correspondiente al periodo temporal de evaluación considerado; Ti, es el intervalo de tiempo de la medida i; n, es el número de mediciones del conjunto de las series de mediciones realizadas en el periodo de tiempo de referencia, T.
El valor del nivel sonoro resultante, se redondea incrementándolo en 0.5 dBA, tomando la parte entera como valor resultante. La toma de registros de los niveles sonoros se realizó durante los días 28 y 29 de mayo de 2015 y 1, 2 y 3 de Junio de 2015. Las condiciones ambientales durante los periodos de medida eran normales, sin fenómenos atmosféricos destacables, oscilando entre 25ºC y 38ºC, con humedades relativas entre 35% y 67% y velocidades del viento por debajo de 1m/s.

**RESULTADOS.**
A continuación se muestran los resultados obtenidos de mediciones in situ de niveles de presión sonora para cada periodo de evaluación y en cada punto de medida evaluado, así como la comparativa de dichos niveles con los criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007 [1].

| | | Periodo Diurno (07:00 – 19:00)h | | Periodo Vespertino (19:00 – 23:00)h | | Periodo nocturno (23:00 – 07:00)h | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Posición de medida | Altura del micro respecto al suelo (m) | Nivel registrado "in situ". $L_d$ (dBA) | Criterios de calidad acústica para uso residencial. RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) | Nivel registrado "in situ". $L_d$ (dBA) | Criterios de calidad acústica para uso residencial. RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) | Nivel registrado "in situ". $L_d$ (dBA) | Criterios de calidad acústica para uso residencial. RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) |
| Punto 1 | 1,5 | 75 | 65 | 74 | 65 | 66 | 55 |
| Punto 2 | 1,5 | 74 | 65 | 72 | 65 | 66 | 55 |
| Punto 3 | 1,5 | 74 | 65 | 73 | 65 | 68 | 55 |
| Punto 4 | 1,5 | 73 | 65 | 72 | 65 | 65 | 55 |

***Tabla 2. Niveles de ruido registrados para periodo diurno, vespertino y nocturno, en cada punto de medida y comparativa con criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007. Valores "in situ" promedio de 9 registros en cada punto.***

Los resultados obtenidos, y representados en la Tabla 2, reflejan que los niveles sonoros registrados "in situ", a una altura del suelo de 1.5m, están por encima de los criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007 [1] para sectores del territorio con predominio de uso residencial. No obstante, estos criterios de calidad están referenciados a una altura de 4m del suelo. Así pues, los resultados obtenidos de mediciones "in situ" deberán corregirse de conformidad con una altura equivalente de 4m. Para ello se diseña un modelo de predicción sonora, en el que se realiza una modelización tridimensional de la zona a estudio introduciendo, elementos del terreno, edificaciones y principales fuentes de ruido. A partir de las mediciones "in situ" se calibra dicho modelo y se obtienen los valores de presión sonora a una altura de 4m respecto al suelo. Además, mediante la utilización de modelos de cálculo predictivos se obtiene, no únicamente un valor de presión sonora en un punto determinado, sino un mapa sonoro de toda la superficie de interés.

Para el diseño del modelo de predicción se ha utilizado el software de predicción PREDICTOR TYPE 7810 Versión-7.10 de Brüel & Kjær. Se ha trabajado bajo el método XPS/NMPB (Método francés de ruido de tráfico) introduciendo las partes más relevantes del modelo, tales como tipología del terreno, edificios y principales fuentes de ruido. En la Figura. 4 se puede ver un detalle del modelado de la zona a estudio.

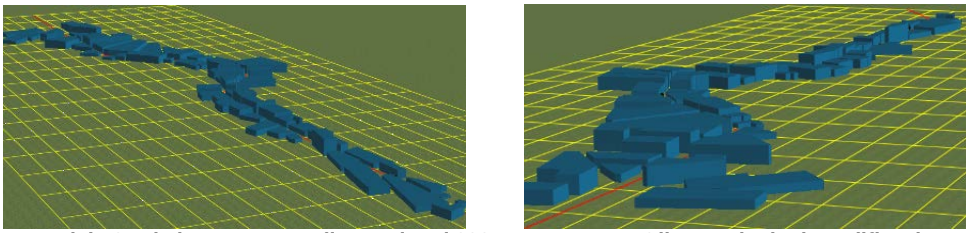


***Figura. 4. Modelo 3D de la zona a estudio. Nacional 332 a su paso por Oliva y principales edificaciones a su alrededor.***

Una vez generado el modelo de la zona a estudio, debe realizarse una "calibración del modelo". Esta "calibración" consiste en colocar en el modelo receptores a 1.5m de altura en los puntos seleccionados para las medidas de campo y a continuación, realizar un cálculo de los niveles de recepción en esos puntos. Los resultados obtenidos se comparan con los medidos "in situ" para comprobar la bondad del modelo. Tras la simulación se comprueba que, en ningún caso, los datos de salida del modelo los datos de salida del modelo difieren más 3 dB de los datos obtenidos "in situ". Al no tratarse de un desfase elevado podemos dar por válida la calibración del modelo y realizar el estudio desde un punto de vista más conservador.

Una vez definido y calibrado el modelo de predicción sonora de la zona a estudio, se evalúan los niveles de presión sonora en cada punto de medida a una altura de 4 metros respecto al suelo, y para cada periodo de evaluación; día, tarde y noche. Los resultados se comparan con los criterios de calidad acústica definidos en el RD 1367/2007 [1] y dicha comparativa (Tabla 3) nos dará el cumplimiento o no de los criterios de calidad acústica.

| | | Periodo Diurno (07:00 – 19:00)h | | Periodo Vespertino (19:00 – 23:00)h | | Periodo nocturno (23:00 – 07:00)h | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Posición de medida | Altura del micro respecto al suelo (m) | $L_d$ dBA | RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) / CUMPLIMIENTO | $L_d$ dBA | RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) / CUMPLIMIENTO | $L_d$ dBA | RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) / CUMPLIMIENTO |
| Punto 1 | 4 | 76 | 65 / NO | 75 | 65 / NO | 66 | 55 / NO |
| Punto 2 | 4 | 75 | 65 / NO | 73 | 65 / NO | 67 | 55 / NO |
| Punto 3 | 4 | 75 | 65 / NO | 74 | 65 / NO | 67 | 55 / NO |
| Punto 4 | 4 | 73 | 65 / NO | 72 | 65 / NO | 66 | 55 / NO |

***Tabla 3. Niveles de ruido registrados para periodo diurno, vespertino y nocturno en cada punto de medida y comparativa con criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007.***

Los resultados presentados en la Tabla 3 muestran que los niveles de presión sonora para cada punto de medida, en cada periodo de evaluación y para una altura de 4 metros respecto al suelo, están por encima de los valores dados como criterios de calidad acústica para sectores del territorio con predominio de uso residencial y, por tanto, no cumplen con los criterios establecidos. En prácticamente la totalidad de la zona a estudio, los niveles sonoros registrados, tanto en periodo diurno como en periodo nocturno exceden en 10dBA la limitación que marca la legislación estatal.

**MEDIDAS CORRECTORAS.**

Se observa que los niveles de ruido generados actualmente por el tráfico rodado de la N-332 a su paso por el municipio de Oliva son excesivamente elevados, superando los criterios de

calidad acústica establecidos en la legislación estatal en, aproximadamente 10dBA, tanto en periodo diurno como en periodo nocturno. Se plantea la necesidad de diversificar el tráfico por viales secundarios o alternativos a la N-332 y rondas de acceso a la Playa de Oliva, esperando que esta actuación tenga como consecuencia una disminución del nivel de presión sonora registrado en la zona a estudio. Esto justifica la necesidad de ejecutar una circunvalación al municipio de Oliva para poder desviar el tráfico que circula por la N-332. En esta línea, se plantean dos posibles escenarios: **Escenario A:** Se considera una disminución a la mitad del caudal de tráfico, tanto de vehículos ligeros como de vehículos pesados, suponiendo que el 50% del tráfico se desvíe por la nueva circunvalación. **Escenario B:** Se considera una disminución del 75% del caudal de tráfico para vehículos ligeros (suponiendo que este 75% se desvíe por la nueva circunvalación) y se prohíbe la circulación de vehículos pesados. Los resultados de predicción correspondientes a los escenarios planteados, se comparan con los criterios de calidad acústica definidos en el RD 1367/2007 para sectores del territorio de uso residencial.

| Posición de medida | Altura del micrófono (m) | Periodo Diurno (07:00 – 19:00)h $L_d$ (dBA) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_d$ (dBA) ESTADO ACTUAL | $L_d$ (dBA) ESCENARIO A | $L_d$ (dBA) ESCENARIO B | Criterios según RD 1367/2007. $L_d$ (dBA) | CUMPLIMIENTO | |
| | | | | | | Escenario A | Escenario B |
| Punto 1 | 4 | 76 | 73 | 64 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 2 | 4 | 75 | 72 | 65 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 3 | 4 | 75 | 72 | 64 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 4 | 4 | 73 | 70 | 64 | 65 | NO | SÍ |

***Tabla 4. Niveles de ruido registrados para periodo diurno en cada punto de medida para Escenario A y Escenario B y comparativa con criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007.***

| Posición de medida | Altura del micrófono (m) | Periodo Vespertino (19:00 – 23:00)h $L_e$ (dBA) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_e$ (dBA) ESTADO ACTUAL | $L_e$ (dBA) ESCENARIO A | $L_e$ (dBA) ESCENARIO B | Criterios según RD 1367/2007. $L_e$ (dBA) | CUMPLIMIENTO | |
| | | | | | | Escenario A | Escenario B |
| Punto 1 | 4 | 75 | 72 | 64 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 2 | 4 | 73 | 70 | 65 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 3 | 4 | 74 | 70 | 64 | 65 | NO | SÍ |
| Punto 4 | 4 | 72 | 69 | 63 | 65 | NO | SÍ |

***Tabla 5. Niveles de ruido registrados para periodo vespertino en cada punto de medida para Escenario A y Escenario B y comparativa con criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007.***

| Posición de medida | Altura del micrófono (m) | Periodo nocturno (23:00 – 07:00)h $L_n$ (dBA) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $L_n$ (dBA). ESTADO ACTUAL | $L_n$ (dBA). ESCENARIO A | $L_n$ (dBA) ESCENARIO B | Criterios según RD 1367/2007. $L_n$ (dBA) | CUMPLIMIENTO | |
| | | | | | | Escenario A | Escenario B |
| Punto 1 | 4 | 66 | 63 | 56 | 55 | NO | NO |
| Punto 2 | 4 | 67 | 64 | 55 | 55 | NO | SÍ |
| Punto 3 | 4 | 67 | 64 | 55 | 55 | NO | SÍ |
| Punto 4 | 4 | 66 | 63 | 55 | 55 | NO | SÍ |

***Tabla 6. Niveles de ruido registrados para periodo nocturno en cada punto de medida para Escenario A y Escenario B y comparativa con criterios de calidad acústica establecidos en el RD 1367/2007.***

**NIVELES DE RUIDO EN EL AÑO 2015 FRENTE A NIVELES DE RUIDO EN EL AÑO 1999.**

En el año 1999 se realizó una campaña de medidas "in situ" para evaluar el efecto de la N-332 a su paso por el municipio de Oliva [3]. Debe hacerse constar que en esa fecha todavía no estaba en vigor la ley del ruido estatal (año 2003) [1], o la autonómica (año 2002) [4], incluso la directiva europea del ruido se publica en el año 2000 [5]. Sin embargo, la metodología de medida es la misma. En la Figura. 5 se puede ver un mapa de botones de los puntos de medida y los niveles de ruido registrados en cada uno de ellos durante el día. Haciendo una equivalencia aproximada con los niveles de presión sonora registrados en 2015 para los puntos de medida establecidos, tenemos la siguiente comparativa presentada en la Tabla 7.

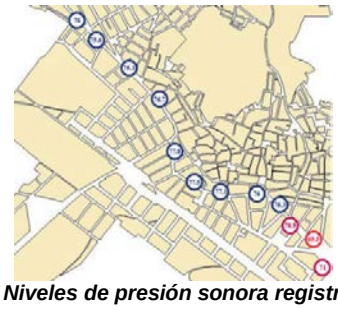


***Figura. 5. Niveles de presión sonora registrados en el año 1999 en la N-332 a su paso por el municipio de Oliva.***

| Posición de medida | LAeq (dBA). Año 1999 | LAeq (dBA). Año 2015 |
|---|---|---|
| Punto 1 | 75,6 | 74,5 |
| Punto 2 | 77,3 | 74,1 |
| Punto 3 | 76,7 | 73,6 |
| Punto 4 | 70,5 | 72,6 |

***Tabla 7. Diferencia entre los niveles de presión sonora registrados en el Año 2015 y los que se registraron en el año 1999.***

Si evaluamos los resultados presentados en la Tabla 7, vemos que los niveles de ruido registrados a la entrada/salida de la población por la zona Norte (Punto 1), son similares a los que se obtuvieron en el año 1999, a pesar de que aumenta el caudal de tráfico, pero, los vehículos a motor, actualmente, generan niveles de ruido inferiores a los existentes hace 16 años. En la entrada/salida de la población por el acceso Sur (Punto 4), los niveles registrados actualmente son ligeramente superiores a los que se registraron en 1999, teniendo en cuenta incluso que desde 1999 a la actualidad se ha habilitado una ronda sur que desvía el flujo de tráfico que se dirige a la playa de Oliva. No obstante, una de las diferencias más significativas se da en puntos intermedios entre la entrada Norte y la entrada Sur, donde los niveles de ruido han disminuido en torno a 3 dBA respecto a los obtenidos 16 años atrás. Una de las principales razones de esta disminución puede ser debida a la ejecución de viales secundarios y/o alternativos a la N-332 y rondas de acceso a la playa de Oliva que diversifican el tráfico de la población, disminuyendo la circulación por dicha Carretera Nacional.

**CONCLUSIONES**

Para poder evaluar el impacto acústico de la N332 a su paso por la localidad de Oliva se realizan un total de 108 mediciones que nos sirven como diagnóstico del ruido generado por la N332 y como punto de partida para la generación y calibración de un modelo de simulación matemática que nos permite obtener mapas de ruido de la zona a estudio a diferentes alturas respecto al suelo. Se comprueba que los niveles de ruido generados a 4m de altura respecto al suelo no cumplen con los criterios de calidad acústica aplicables a áreas urbanizadas existentes en sectores de territorio con predominio de suelo de uso residencial, de acuerdo con el RD 1367/2007. La mayor afección de ruido existente en la zona a estudio se da durante los periodos diurno y vespertino y es debido, mayoritariamente a la circulación de vehículos pesados. Se realiza una comparativa de los niveles de ruido registrados con los que se obtuvieron en el año 1999, de la cual se extrae que los niveles de ruido registrados actualmente a la entrada/salida de la población por la zona Norte, son similares a los que se obtuvieron en el año 1999; en la entrada/salida de la población por el acceso Sur, los niveles de ruido registrados actualmente respecto a los que se obtuvieron en 1999 han aumentado ligeramente y en puntos intermedios entre la entrada Norte y la entrada Sur, los niveles de ruido han disminuido unos 3dBAs respecto a los obtenidos 16 años atrás. Esto demuestra, que

un desvío considerable de la circulación en la N-332 a su paso por Oliva, podría disminuir de forma considerable el ruido de tráfico generado en la zona y, por tanto, justifica la realización de una circunvalación de tráfico como alternativa a la circulación por la N-332.

Buscando el cumplimiento de los criterios establecidos por la legislación, se plantean dos medidas correctoras definidas como Escenario A y Escenario B. La primera supone una disminución al 50% del caudal de tráfico ligero y pesado que circula por la N-332 a su paso por Oliva, asumiendo que el otro 50% circularía por la nueva circunvalación. En este caso se disminuyen los niveles de presión sonora en 3dBA para cada punto y en cada periodo de evaluación pero siguen sin alcanzarse los criterios de calidad establecidos en la legislación estatal. La segunda (Escenario B), supone que el 75% del tráfico de vehículos ligeros que circula actualmente por la N-332 a su paso por Oliva, se desvía por la nueva circunvalación y se prohíbe la circulación de vehículos pesados. En este caso sí se alcanzarían los criterios de calidad acústica establecidos por la legislación estatal. No obstante, se recomienda, limitar de alguna forma la velocidad del tráfico en periodo nocturno.

**REFERENCIAS**

[1] REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

[2] Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.

[3] Trabajo Final de Carrera. “Impacto acústico de la Nacional 332 a su paso por Oliva”. Escuela Politécnica Superior de Gandia. Universidad Politécnica de Valencia. Año 1999. Autor: Javier Juan-Senabre Pérez. Directores: Jaime Ramis Soriano y Jesús Alba Fernández.

[4] LEY 7/2002, de 3 de diciembre, de la Generalitat Valenciana, de Protección contra la Contaminación Acústica.

[5] DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DETECCIÓN Y PRIORIZACIÓN DE PUNTOS DE CONFLICTO EN LA RED DE CARRETERAS DE ANDALUCÍA A PARTIR DE LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO DE LA 2ª FASE EMPLEANDO LA TOOLBOX GARITA

PACS: 43.50.Rq

Gey Flores, Ricardo[1]; Cueto Ancela, José Luis[1]; Hernández Molina, Ricardo[1]; Sales Márquez, Diego[1]
(1) Universidad de Cádiz. Laboratorio de Ingeniería Acústica.
Edificio C.A.S.E.M. Campus Río San Pedro
11510 Puerto Real (Cádiz). España
Tel: +34 956 016051
E-Mail: ricardo.gey@uca.es

## ABSTRACT

Once developed the second round of Strategic Noise Maps of the major roads under the competence of the Regional Government of Andalusia, GARITA (GARITA is the Spanish acronym for Environmental Noise Management of Transport Infrastructures in Andalusia) tool was applied to the identification and rank of hot spots. GARITA was programmed under ArcGIS 10.0 platform, which guarantee the analysis of more than 1300 Km of roads in an easy and simple way. In this paper are presented the results and main conclusions after this set of analysis.

Keywords: Noise Action Plans.

## RESUMEN

Una vez elaborados los Mapas Estratégicos de Ruido de la Red de Carreteras de Andalucía en su 2ª Fase, se empleó la herramienta GARITA (Gestión Ambiental del Ruido de Infraestructuras de Transporte de Andalucía) para la detección y priorización de zonas acústicamente conflictivas. La herramienta, implementada en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.0, se ejecutó sobre los más de 1300 km de carreteras estudiados. En esta comunicación se revisan los principios de diseño de GARITA y se presentan los principales resultados y conclusiones tras la implementación de la herramienta.

Palabras clave: Planes de Acción contra el Ruido

## INTRODUCCIÓN

La adopción de la Directiva 2002/49/CE (END) [1] genera en la Junta de Andalucía (JA) como en tantos otros gobiernos europeos la responsabilidad de actuar contra el ruido ambiental. El primer paso de esta tarea implica el diagnóstico de la situación acústica ambiental. Esto se lleva a cabo mediante los Mapas Estratégicos de Ruido. Una de las variables más importantes que generan estos mapas es la estimación de la población expuesta a los diferentes niveles de ruido. La propia Junta tiene desarrollado un marco legislativo dentro del cual se establecen los objetivos de calidad para las distintas zonas acústicas. Una vez llevado a cabo el diagnóstico se debe actuar contra el ruido ambiental mediante los llamados, planes de acción.

La Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía consciente de su responsabilidad sobre los ciudadanos y con el afán de garantizar la calidad ambiental en el entorno de sus infraestructuras de carreteras pone en marcha y financia el proyecto GARITA [2] [3]. Su intención es la de sistematizar las tareas que deben llevarse a cabo entre los mapas estratégicos de ruido que se elaboren y la ejecución de las obras públicas que se definan en los proyectos que formen parte de los planes de acción. Los criterios que debían prevalecer son los relacionados con eficiencia y el coste económico. Para ello se diseñó una herramienta informática que permitiría que los expertos de la consejería pudieran auscultar la situación acústica de las distintas carreteras y definir las actuaciones contestando a fáciles preguntas como: ¿Dónde actuar? ¿Cuándo (con qué urgencia y en qué orden) actuar? ¿Cómo actuar? ¿Qué efectos (positivos/negativos) tendrá la actuación? ¿Cuánto dinero implica la actuación?

Esta herramienta es lo que llamaríamos un Sistema de Soporte a la toma de Decisiones, en otras palabras, para ayudar a los responsables a tomar decisiones usando datos relevantes, así como para clasificar los problemas (emisor-receptor). Para llevar a cabo la tarea, se diseñó como un sistema basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) ya que los SIG ofrecen una plataforma adecuada para el tratamiento de problemas espaciales como el ruido [4] [5] [6] y los técnicos de la JA ya están familiarizados con éstos. Otra ventaja es que aúna herramientas de geo-procesamiento, algoritmos que soportan la lógica de las decisiones y gestión de base de datos geográficos; todo ello se conoce como Sistemas de Soporte a la Decisión o DSS [7] [8] [9].

Los pasos que deben estar implicados en este proceso son:

- Identificación de todos los puntos calientes (“hot spots” o puntos de conflicto) en relación a la normativa vigente.
- Clasificación de la gravedad de unos problemas respecto a otros mediante la incorporación de un indicador.
- Analizar las posibles alternativas para la minimización de dicho ruido valorando su eficacia y coste, y sus posibles efectos secundarios.
- Proponer la solución, y proporcionar los datos e informes que avalan dicha solución.
- Comparativa antes y después de la implantación de las medidas.

Pero nada es tan sencillo, ya que:

- No hay un indicador (de salud ambiental, de justicia ambiental) aceptado que normalice la casuística (edificios sensibles, residenciales, etc.).
- La siguiente es una cuestión controvertida: nosotros creemos que la identificación, clasificación y análisis de las zonas de conflicto y la propuesta de medidas contra el ruido no son pasos (cuestiones) independientes entre sí.
- Además, existe una dependencia entre la calidad de las estimaciones y calidad del mapa de ruido elaborado.

- Los aspectos micro no están contemplados en la mayoría de los mapas estratégicos de ruido.

- Hay aspectos que no se pueden resolver con la herramienta, y deben ser abordados externamente, como la eficacia de las medidas mediante el uso de software de propagación de ruido y la evaluación de la calidad del conjunto de información mediante visitas in situ, etc.

Con todo ello, los técnicos se encargarán de plantear las medidas correctivas y preventivas contra el ruido a corto, medio y largo plazo.

## OBJECTIVOS

Esta comunicación tiene por objeto dos aspectos complementarios:

1. Describir los fundamentos metodológicos en los que se ha fundado la herramienta GARITA y cuál ha sido su evolución a lo largo del proyecto en relación a las necesidades de los técnicos de la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento y Vivienda y cuáles serán las futuras líneas que orienten su estructura.
2. Mostrar los resultados de su aplicación en los mapas estratégicos de ruido de la Red de Carreteras de Andalucía en su segunda fase.

## PRINCIPIOS DE DISEÑO DE GARITA v.1

### Principios generales

- Las soluciones técnicas contra el ruido que contempla la herramienta se limitan a:
  a. Pantallas acústicas.
  b. Renovación de asfalto. Asfalto poroso.
  c. La reducción de la velocidad durante la noche (vehículos pesados).
  d. Y, como última solución el aislamiento.
- Se utilizan solo los mapas Lnoche.
- Las zonas de conflicto (hot spots) son seleccionadas siguiendo los criterios de densidad de población expuesta (actualmente mediante la determinación de los edificios expuestos según el método END) por longitud de carreteras (clústeres donde se incorporan los edificios).
- Para analizar los clústeres se utiliza un indicador que normaliza la gravedad de las situaciones acústicas (niveles de ruido y personas expuestas) y las hace comparables. Se ha empleado un indicador ad hoc: el SVRA (Sistema de Valoración del Ruido Ambiental).
  - El indicador se calcula a partir de la población que se encuentra por encima de los objetivos de calidad acústica [10]. Todos los que están por debajo solo se consideran a efectos de estimar la mejora global de la situación antes/después.

### Datos de entrada en formato SHAPE

- Eje central de la carretera (definición en X,Y). Polilínea con atributos: matrícula carretera a estudio, tipología (convencional, doble calzada, autovía), PK inicio, PK fin y longitud.
- Edificaciones. Polígonos con atributos: ID edificio, uso de edificio y zonificación acústica y número de plantas.

- Evaluación de edificios. Puntos que representan los centroides de los edificios con los datos asociados de personas y ruido (a 4 metros de altura sobre la fachada más expuesta).

**Datos de salida**

- *Salida numérica*. Hoja Excel con la lista de zonas (sectores de la carretera) con información del indicador acústico (SVRA), población afectada, nº de edificios afectados, identificador inequívoco de la zona (sector) y distancia a origen (DO) de su emplazamiento. por orden de problemas en relación al indicador. El indicador es sólo calculado cuando se supera el objetivo de calidad del tipo de edificación a estudio (residencial) [10].
    a. La población se contabiliza de 2 maneras:
        i. Teniendo en cuenta la población que supera los objetivos de calidad acústica.
        ii. Toda la población (para calcular la eficacia que también incluye a gente por debajo de los objetivos de calidad)
    b. Histograma (absoluto) por población y ruido real (no solo se provee indicador).
- *Mapa de coropleta*. Muestra los polígonos que representan los sectores en que se ha dividido la zona de influencia de la carretera. La información contenida en este Shapefile de salida es la misma de la hoja Excel. Existe la posibilidad de visualizar este mapa de coropleta sobre Google-Earth (exportándolo como archivo ".kml").
- *Edificios afectados*. Identificación de los edificios, nº de residentes, ruido a 4 m en la fachada más expuesta y referencia catastral. Este último dato nos permite acceder a la dirección del edificio (calle, número y municipio).

La salida numérica de la herramienta nos permite priorizar los puntos de conflicto detectados a partir del índice acústico. Así mismo, nos permite calcular de manera indirecta los costes económicos de las soluciones de tipo barrera o asfalto fonoabsorbente, ya que sabemos los metros de la carretera que generan afección (en tramos de 100 en 100 m) y el emplazamiento de la población afectada; en margen izquierdo de la carretera, en margen derecho o en ambos a la par.

Externamente se calcula la eficacia y posibles efectos secundarios. Las soluciones de tipo barrera, asfalto poroso o reducción de velocidad (si fuera una solución técnica viable) pueden simularse mediante software predictivo.

Finalmente, una vez que contamos con información de costes y eficacia, se determinan y reordenan los casos por orden de prioridad. Este orden puede variar si tras la visita in situ a los puntos conflictivos se comprueba que la afección estimada es mayor a la real.

**Aspectos que serán mejorados en la herramienta en la v.2**

- DSS puede proporcionar decisiones fiables para estas situaciones repetitivas, pero no puede responder de forma creativa a circunstancias inusuales, situaciones abiertas, variables desconocidas o en escenarios complejos como el de las aglomeraciones.
- No analiza problemas relacionados con los mapas. No chequea la calidad del mapa.
- El análisis de edificios residenciales y sensibles se lleva por separado.
- Cuando se aplica a segmentos de carretera en curvas cerradas puede dar problemas ya que 100 m lineales de carretera no están relacionados siempre con la misma superficie de análisis.
- La eficacia de las medidas se realiza externamente.
- Las posibles medidas contra el ruido y el método de análisis por clústeres están vinculados; de tal manera que no es lo mismo la solución barrera, asfalto, velocidad y

aislamiento. Por ejemplo, si pudiéramos activar sólo la opción “BARRERA”, GARITA estaría programado para considerar un segmento de longitud 100 metros en sentido longitudinal a la reserva central de la carretera. Estos segmentos marcan las zonas de búfer de la derecha y de la izquierda (separadamente) de la carretera para obtener un mapa de coropleta. Estos mapas proporcionarían una manera fácil de visualizar cómo la densidad de habitantes junto con su indicador de ruido [2] [3] varía de izquierda a derecha a lo largo de la carretera. GARITA podría comparar todos los perfiles de índice a derecha e izquierda de la carretera, en busca de picos máximos del índice cuando la solución es barreras acústicas. Esto requeriría, en primer lugar, la reunificación de toda la población a la derecha y a la izquierda de la carretera, y en segundo lugar, generar una ventana deslizante de análisis de datos de tamaño 400 metros y que se movería en pasos de 100 metros para ayudar a encontrar la mayor población expuesta acumulada. Sin embargo, la opción “ASFALTO” analizaría a la vez los márgenes izquierdo y derecho en tramos de 1000 metros con ventanas de análisis deslizantes.

## RESULTADOS EN LAS CARRETERAS DE ANDALUCIA

Se ha aplicado GARITA sobre un total de 96 UMEs (Unidades de Mapa Estratégico), que representan algo más de 1333 km de la Red de Carreteras de Andalucía (RCA). En la Tabla 1 se muestran los datos más relevantes obtenidos tras la ejecución de esta herramienta.

| PROVINCIA | UMEs | KM | SVRA TOTAL | POBLACIÓN AFECTADA | SECTORES ESTUDIADOS | SECTORES AFECTADOS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ALMERÍA | 11 | 185,0 | 6946 | 3936 | 3775 | 6,3% |
| CÁDIZ | 11 | 219,1 | 2435 | 1619 | 4436 | 3,6% |
| CÓRDOBA | 4 | 21,7 | 12378 | 5248 | 440 | 11,1% |
| GRANADA | 8 | 253,8 | 11737 | 4294 | 5238 | 5,2% |
| HUELVA | 11 | 110,0 | 6830 | 4027 | 2182 | 7,3% |
| JAÉN | 2 | 43,5 | 43 | 32 | 802 | 1,5% |
| MÁLAGA | 16 | 192,1 | 17044 | 9533 | 3820 | 9,5% |
| SEVILLA | 33 | 308,0 | 64842 | 25706 | 6282 | 13,4% |
| TOTALES | 96 | 1333,2 | 122255 | 54395 | 26975 | 7,7% |

*Tabla 1*

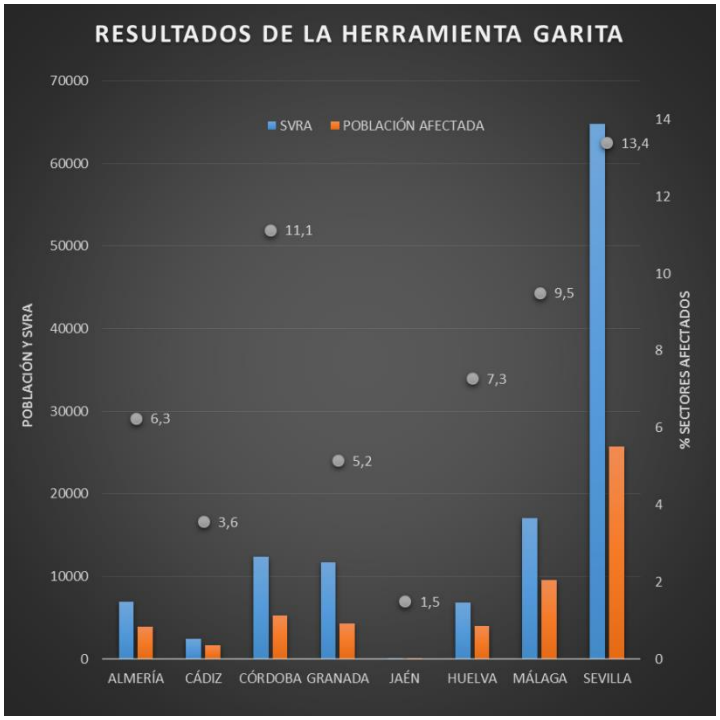



*Fig. 1. Resultados globales de la herramienta GARITA por provincia*

En la Figura 1 se muestran los resultados globales de la herramienta GARITA para cada provincia andaluza. La suma del índice acústico SVRA de las carreteras a estudio por provincia es mayor en la de Sevilla, donde también encontramos el mayor número de población afectada por ruido nocturno. Del mismo modo, es en esta provincia donde se da el mayor porcentaje de sectores (fracciones en que se ha dividido el área de influencia de las carreteras) con afección acústica según el indicador Lnoche.

**Resultados por provincia evaluando la solución de tipo barrera acústica**

A continuación se muestran para cada provincia los diez sectores de carretera más afectados por ruido según el indicador Lnoche. Se estudia de manera independiente cada sentido de la marcha.

| PROVINCIA | UME | MARGEN | IDSECTOR | DO SECTOR | SVRA | POBLACIÓN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ALMERÍA | A1050 | IZQ | 92 IZQ A-1050 | 9,2 | 414 | 116 |
| | A1050 | DER | 29 DER A-1050 | 2,9 | 377 | 118 |
| | A1050 | DER | 95 DER A-1050 | 9,5 | 251 | 101 |
| | A1050 | DER | 94 DER A-1050 | 9,4 | 241 | 79 |
| | A1050 | IZQ | 21 IZQ A-1050 | 2,1 | 238 | 196 |
| | A1050 | DER | 22 DER A-1050 | 2,2 | 235 | 194 |
| | A1050 | IZQ | 26 IZQ A-1050 | 2,6 | 184 | 119 |
| | A1050 | DER | 91 DER A-1050 | 9,1 | 180 | 50 |
| | A1050 | IZQ | 93 IZQ A-1050 | 9,3 | 159 | 54 |
| | A1050 | DER | 37 DER A-1050 | 3,7 | 156 | 132 |
| CÁDIZ | A383 | IZQ | 73 IZQ A-383 | 7,3 | 271 | 184 |
| | A491 | IZQ | 266 IZQ A-491 | 26,6 | 204 | 150 |
| | A383 | IZQ | 60 IZQ A-383 | 6 | 148 | 83 |
| | A491 | DER | 273 DER A-491 | 27,3 | 93 | 63 |
| | A491 | DER | 274 DER A-491 | 27,4 | 92 | 63 |
| | A314 | DER | 89 DER A-314 | 8,9 | 55 | 42 |
| | A2075 | DER | 46 DER A-2075 | 4,6 | 48 | 48 |
| | A381 | IZQ | 1 IZQ A-381 | 0,1 | 45 | 36 |
| | A381 | IZQ | 806 IZQ A-381 | 80,6 | 45 | 14 |
| | A491 | DER | 0 DER A-491 | 0 | 41 | 28 |
| | A431 | IZQ | 5 IZQ A-431 | 0,5 | 1490 | 385 |

| PROVINCIA | UME | MARGEN | IDSECTOR | DO SECTOR | SVRA | POBLACIÓN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CÓRDOBA | A431 | DER | 4 DER A-431 | 0,4 | 1166 | 301 |
| | A431 | DER | 0 DER A-431 | 0 | 1056 | 331 |
| | A431 | IZQ | 28 IZQ A-431 | 2,8 | 943 | 777 |
| | A431 | IZQ | 9 IZQ A-431 | 0,9 | 765 | 291 |
| | A431 | IZQ | 7 IZQ A-431 | 0,7 | 711 | 215 |
| | A431 | IZQ | 6 IZQ A-431 | 0,6 | 592 | 153 |
| | A431 | DER | 5 DER A-431 | 0,5 | 571 | 160 |
| | A431 | IZQ | 1 IZQ A-431 | 0,1 | 540 | 169 |
| | A431 | IZQ | 4 IZQ A-431 | 0,4 | 503 | 130 |
| GRANADA | A92G | DER | 21 DER A-92G | 2,1 | 1171 | 170 |
| | A92G | DER | 23 DER A-92G | 2,3 | 1034 | 205 |
| | A92G | DER | 24 DER A-92G | 2,4 | 581 | 104 |
| | A92G | DER | 15 DER A-92G | 1,5 | 460 | 82 |
| | A92-3 | IZQ | 472 IZQ A-92 | 223,86 | 356 | 64 |
| | A92-3 | IZQ | 475 IZQ A-92 | 224,16 | 321 | 58 |
| | A92G | DER | 20 DER A-92G | 2 | 306 | 49 |
| | A92G | IZQ | 37 IZQ A-92G | 3,7 | 247 | 84 |
| | A92G | DER | 19 DER A-92G | 1,9 | 204 | 84 |
| | A92G | DER | 25 DER A-92G | 2,5 | 200 | 55 |
| HUELVA | A5000 | DER | 96 DER A-5000 | 9,6 | 225 | 92 |
| | A5000 | DER | 97 DER A-5000 | 9,7 | 219 | 85 |
| | A5000 | DER | 95 DER A-5000 | 9,5 | 218 | 95 |
| | A5000 | IZQ | 92 IZQ A-5000 | 9,2 | 183 | 57 |
| | A493 | IZQ | 39 IZQ A-493 | 3,9 | 182 | 81 |
| | A497 | IZQ | 0 IZQ A-497 | 0 | 169 | 169 |
| | A493 | IZQ | 42 IZQ A-493 | 4,2 | 162 | 42 |
| | A492 | IZQ | 2 IZQ A-492 | 0,2 | 152 | 125 |
| | A5056 | DER | 28 DER A-5056 | 2,8 | 144 | 106 |
| | A492 | IZQ | 7 IZQ A-492 | 0,7 | 139 | 69 |
| JAÉN | A316-2 | IZQ | 263 IZQ A-316 | 67,71 | 9 | 5 |
| | A316-2 | IZQ | 282 IZQ A-316 | 69,61 | 7 | 5 |
| | A316-2 | IZQ | 281 IZQ A-316 | 69,51 | 6 | 5 |
| | A316-2 | DER | 269 DER A-316 | 68,31 | 5 | 2 |
| | A316-2 | IZQ | 264 IZQ A-316 | 67,81 | 4 | 4 |
| | A316-2 | DER | 301 DER A-316 | 71,51 | 3 | 2 |
| | A316-2 | DER | 313 DER A-316 | 72,71 | 3 | 3 |
| | A316-2 | DER | 188 DER A-316 | 60,21 | 2 | 2 |
| | A316-1 | IZQ | 26 IZQ A-316 | 2,6 | 1 | 1 |
| | A316-2 | DER | 187 DER A-316 | 60,11 | 1 | 1 |
| MÁLAGA | A368 | DER | 72 DER A-368 | 12,2 | 1331 | 745 |
| | A7282 | IZQ | 54 IZQ A-7282 | 14,74 | 527 | 273 |
| | A368 | DER | 71 DER A-368 | 12,1 | 509 | 326 |
| | A7057 | DER | 3 DER A-7057 | 0,3 | 418 | 131 |
| | A387 | IZQ | 57 IZQ A-387 | 16,76 | 347 | 160 |
| | A368 | DER | 64 DER A-368 | 11,4 | 282 | 232 |
| | A368 | DER | 23 DER A-368 | 7,3 | 275 | 187 |
| | A368 | DER | 65 DER A-368 | 11,5 | 262 | 233 |
| | A7054 | DER | 123 DER A-7054 | 12,3 | 257 | 175 |
| | A368 | DER | 70 DER A-368 | 12 | 252 | 211 |
| SEVILLA | A92_1 | IZQ | 99 IZQ A-92 | 9,9 | 3286 | 475 |
| | A92_1 | DER | 101 DER A-92 | 10,1 | 1548 | 255 |
| | A376 | DER | 23 DER A-376 | 2,3 | 1232 | 560 |
| | A92_1 | DER | 102 DER A-92 | 10,2 | 1219 | 219 |
| | A92_1 | DER | 99 DER A-92 | 9,9 | 1201 | 601 |
| | A92_1 | IZQ | 32 IZQ A-92 | 3,2 | 1159 | 136 |
| | A92_1 | DER | 19 DER A-92 | 1,9 | 1034 | 267 |
| | A92_1 | DER | 25 DER A-92 | 2,5 | 1024 | 114 |
| | A376 | IZQ | 24 IZQ A-376 | 2,4 | 1014 | 364 |
| | A376 | IZQ | 25 IZQ A-376 | 2,5 | 864 | 223 |

*Tabla 2*

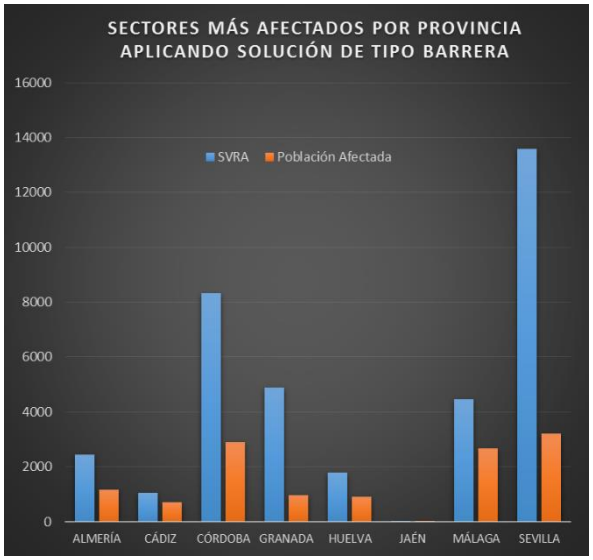



*Fig. 2. Representación de sectores mostrados en la Tabla 2 por provincia*

En la Figura 2 se aprecia que los máximos valores de SVRA se encuentran en sectores de las carreteras de la provincia de Sevilla, seguida de la provincia de Córdoba, al estudiar el kilómetro más afectado por ruido nocturno.

Sin embargo, se observa que la población afectada en este kilómetro es similar en las provincias de Sevilla, Córdoba y Málaga.

Para poblaciones similares afectadas, como es el caso de las tres provincias mencionadas, un mayor valor del índice acústico SVRA evidencia la existencia de mayores niveles de exposición a ruido nocturno.

## CONCLUSIONES

- Los MER de la RCA en la segunda fase, muestran un promedio de 41 personas afectadas por ruido nocturno y por km de carretera. La máxima concentración de población expuesta está en Córdoba con 242 personas por km y la mínima en Jaén con 1 persona por km. Sin embargo, se aprecia que los mayores valores del indicador acústico por persona se dan en Granada.
- La herramienta GARITA va a evolucionar en la versión 2 en capacitarla para hacer análisis en 3 dimensiones, lo que nos permitirá dar resultados más ajustados a la realidad.
- En esta comunicación presentamos los diez sectores con mayores indicadores de exposición por provincia. Con GARITA podemos evaluar medidas de mitigación como el asfalto, la velocidad, o incluso la barrera, que requieren una continuidad. Así tendremos un indicador general para todos los sectores con lo que podremos evaluar la eficacia antes/después y el coste de dicha medida. De esta manera podremos seleccionar la mejor solución de las propuestas.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se encuentra cofinanciado por la Unión Europea, con cargo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Queremos mostrar nuestro agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, con especial atención a la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, encargada de la gestión de los Proyectos de I+D+i relativos al ámbito competencial de la Consejería de Obras Públicas y Vivienda para los años 2011 a 2013 por su confianza y apoyo en el desarrollo del mismo.

## REFERENCIAS

[1] Directive 2002/49/EC of the European parliament and of the council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

[2] Cueto, J.L.; et al. *Sistema de Gestión Ambiental del Ruido de las Infraestructuras de Transporte en Andalucía.* Tecniacústica. Évora. 2012.

[3] Cueto, J.L.; et al. *Herramienta SIG para la toma de decisiones en la lucha contra el ruido de grandes infraestructuras de tráfico en Andalucía: proyecto GARITA.* Tecniacústica. Valladolid. 2013.

[4] SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems). *Practitioner Handbook for Local Noise Action Plans*. 2008 http://www.silence-ip.org/

[5] SMILE (Sustainable Mobility Initiatives for Local Environment), *Guidelines for Road Traffic Noise Abatement*. 2004

[6] Desanghere, G. QCITY Quiet City Transport DELIVERABLE 6.2 Part 1 - *General measures for noise mitigation* January 31, 2007 http://www.qcity.org/

[7] Polinder, H.; et al. QCITY Quiet City Transport DELIVERABLE 6.3 *Decision support tool* December, 2008 http://www.qcity.org/

[8] Heich H., SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems) WP I.4 *Existing approaches and tools and possibilities for upgrade*. January 2008 http://www.silence-ip.org/

[9] Heich H., SILENCE (Sustainable Development Global Change and Ecosystems) WP I.4 *Upgrade of Decision Support System*. February 2008 http://www.silence-ip.org/

[10] REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# TECNICA NO DESTRUCTIVA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ DINÁMICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS

PACS: 43.50.Lj

Fernández Vázquez, Victoriano; Terán Sierra, Fernando J.; Paz Núñez, Francisco; Huertas Gallardo, Pedro; Expósito Paje, Santiago
Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad de Castilla-La Mancha.
Avda. Camilo José Cela s/n 13071 Ciudad Real, España
Tel: 926 295300
E-mail: Victoriano.Fernandez@uclm.es

## ABSTRACT

Dynamic stiffness of wearing courses could play an important role in the mitigation of tire/road noise. This paper shows the dynamic stiffness results measured in different types of gap-graded bituminous mixtures (SMA and BBTM). These measurements were conducted in both laboratory and *in situ* conditions. On the other hand, the relation between the binder content of the mixtures and their dynamic stiffness will be also studied on BBTM mixtures. The Young modulus will be also achieved by means of a theoretic model and the dynamic stiffness measurements carried out.

## RESUMEN

La rigidez dinámica de una capa de rodadura es uno de los mecanismos que puede participar en la mitigación del ruido de rodadura. En este trabajo se presentan los resultados de rigidez dinámica de varios tipos de mezclas bituminosas discontinuas (SMA y BBTM) en medidas realizadas in situ y en laboratorio sobre testigos. Por otro lado, se estudia la relación entre el contenido de ligante y la rigidez dinámica de varias mezclas bituminosas BBTM y se obtiene su módulo de Young a partir de un modelo teórico y de los datos de rigidez dinámica determinados en laboratorio.

## INTRODUCCIÓN

La rigidez dinámica de la capa de rodadura de un pavimento, o su equivalente, la impedancia mecánica, es una propiedad estructural relacionada con la vibración de dicha superficie, y por tanto, con el ruido de rodadura generado por el propio tráfico. Según algunos autores, una considerable reducción de la rigidez dinámica de la superficie del pavimento podría llevar a reducciones del ruido de rodadura de hasta 5 dB(A). Dicha reducción estaría concentrada en las medias frecuencias del espectro de ruido de rodadura, es decir, en la zona donde toma los valores máximos.
La rigidez dinámica de la capa de rodadura de un pavimento se ha revelado como una característica estructural, aún no suficientemente estudiada, cuya modificación podría reducir considerablemente el ruido de rodadura generado en la interacción entre el neumático y el pavimento.

Generalmente los materiales convencionales empleados en la construcción de carreteras presentan una rigidez dinámica muy superior a la de los neumáticos, sin embargo, según algunos autores, se podría conseguir una importante reducción en la emisión de ruido si se diseñasen mezclas con una rigidez dinámica del mismo orden de magnitud que los neumáticos [1, 2]. En la Figura 1 se muestra la rigidez dinámica típica que puede encontrarse en una mezcla bituminosa en caliente y en un neumático. Los gráficos mostrados corresponden a ensayos realizados por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA$^2$IC) sobre una mezcla SMA en caliente y sobre el neumático de referencia Pirelli P6000 empleado en los ensayos CPX desarrollados por dicho laboratorio.

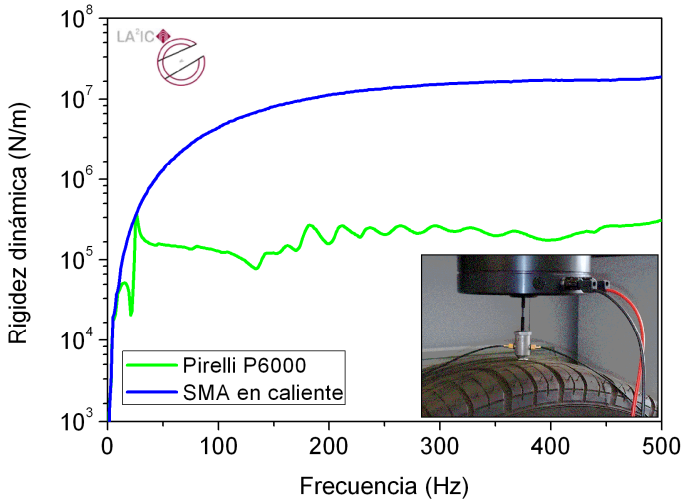



Figura 1. Rigidez dinámica de una mezcla bituminosa en caliente y de un neumático

**TÉCNICAS EXPERIMENTALES**

Tanto la rigidez dinámica como la impedancia mecánica son características de una estructura (probeta de mezcla bituminosa o capa de rodadura). Estas magnitudes relacionan, en términos de números complejos, los vectores fuerza y movimiento de una superficie, la cual se encuentra solicitada por una fuerza dinámica.

La determinación de los espectros de rigidez dinámica se ha realizado mediante el método no resonante [3] directamente sobre la cara superior de las probetas. El equipo de ensayo cuenta con los siguientes elementos: una cabeza de impedancia, la cual registra las señales fuerza y movimiento de la superficie estudiada; un excitador de vibraciones, encargado de realizar la excitación; un amplificador que acondiciona la señal; y un sistema multi-analizador que se encarga de generar y registrar las señales fuerza y movimiento. A partir de estas señales se elaborará la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de las funciones rigidez dinámica e impedancia mecánica. El equipo excitador de vibraciones se muestra en la Figura 2.

El método no resonante, con el cual se han realizado las mediciones, permite obtener el espectro de rigidez dinámica de las mezclas bituminosas estudiadas, así como el de la impedancia mecánica. Estos espectros permitirán comparar las distintas mezclas bituminosas de acuerdo a sus características constructivas. Por otro lado, y gracias a un modelo teórico, se determinará el módulo de Young mediante la minimización de una función objetivo $\Delta(E)$, donde se cuantifica la desviación de los valores de impedancia mecánica teóricos ($Z_R$) de los valores medidos ($Z_m$) por el equipo sobre probetas.

$$\Delta(E) = \sqrt{\Sigma_{i=1}^{n} |Z_R(\omega_i) - Z_m(\omega_i)|^2}$$

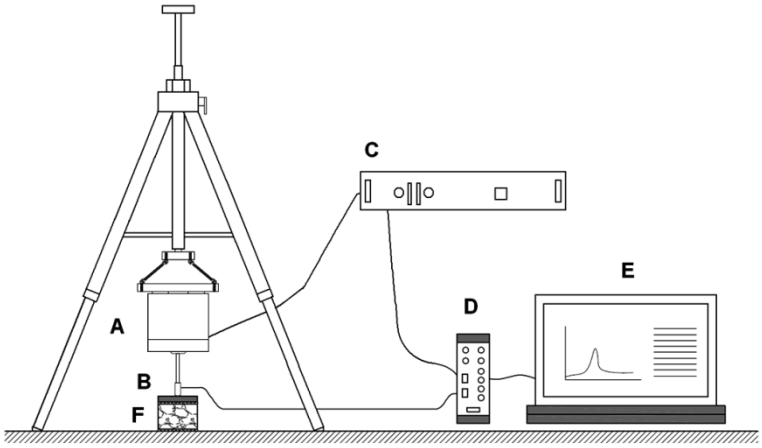



Figura 2. Esquema del equipo para la determinación de la rigidez dinámica: A) excitador de vibraciones, B) cabeza de impedancia, C) amplificador, D) analizador multicanal, E) ordenador portátil, F) probeta

**MATERIALES ESTUDIADOS**

Se han estudiado mezclas bituminosas del tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). Estas mezclas son de tipo discontinuo, formadas por un esqueleto de árido grueso fuertemente cohesionado debido a la alta proporción de filler y de betún y al bajo contenido de huecos en mezcla. Sus características aseguran una mezcla muy duradera y con gran capacidad para resistir deformaciones permanentes. Por otro lado, las mezclas SMA ordinarias tienen una elevada rugosidad, lo que produce unas propiedades excelentes de resistencia al deslizamiento. Debido a estas características, este tipo de mezclas son ideales para su extendido en todo tipo de vías, ya que permiten ahorrar costes de mantenimiento así como mejorar las condiciones de seguridad.

Para este trabajo se han ensayado siete tipos de mezcla SMA con diferentes características tanto en el contenido de aditivos como en el modo de construcción [4]. Para cada uno de los tipos de mezcla bituminosa se ha dispuesto de un juego de 4 probetas de características similares, de modo que se obtenga reproducibilidad en los resultados obtenidos. A parte de las mezclas SMA, se han ensayado mezclas BBTM 11A con distinto contenido de ligante. Las mezclas BBTM son mezclas extendidas en capas muy finas.

Por último, se han realizado medidas de rigidez dinámica *in situ* sobre dos tramos de mezcla BBTM 11A con y sin alto contenido en polvo de caucho añadido por vía húmeda. Los Tramos experimentales están situados en la zona periurbana de Tomelloso, y está compuesto por dos carriles, uno por sentido de la marcha. El tramo, originalmente construido con una mezcla del tipo AC 16 surf S, se rehabilitó con una mezcla bituminosa discontinua BBTM 11A de 3 cm de espesor. La mezcla se diseñó con polvo de caucho añadido por vía húmeda, en un contenido del 20 % por peso del ligante (1,5 % respecto del peso total de la mezcla). La mezcla de referencia (sin alto contenido en polvo de caucho) permite contrastar el efecto del polvo de caucho en el comportamiento acústico de la nueva mezcla.

Las mezclas que se han ensayado en este trabajo, junto con sus características, se muestran en la Tabla 1. Todas las probetas han sido fabricadas en laboratorio y se han moldeado en probetas cilíndricas de 60 mm de altura y 100 mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 1. Tipos de mezclas estudiadas

| Mezcla | Característica |
|---|---|
| SMA8-PH0 | TMA 8 mm, PMB, alto contenido en huecos |
| SMA8-RH0 | TMA 8 mm, Polvo de caucho añadido por vía seca |
| SMA11-PH0 | TMA 11 mm, PMB |
| SMA11-PH0-H | TMA 11 mm, PMB, alto contenido en huecos |
| SMA11-PH0-L | TMA 11 mm, PMB, alto contenido en ligante |
| SMA11-CH0 | TMA 11 mm, betún convencional |
| SMA11-RH0 | TMA 11 mm, polvo de caucho añadido por vía seca |
| SMA11-PW0 | TMA 11 mm, PMB, mezcla templada |
| SMA11-PC0 | TMA 11 mm, emulsión PMB, mezcla en frío |
| SMA16-CH0 | TMA 16 mm, betún convencional |
| SMA16-PH0 | TMA 16 mm, PMB |
| SMA11-R*H0 | TMA 16 mm, polvo de caucho añadido por vía húmeda |
| SMA16-CH10 | TMA 16 mm, betún convencional, RAP 10% |
| SMA16-CH20 | TMA 16 mm, betún convencional, RAP 20% |
| BBTM11-PH0-4.5L | TMA 11 mm, PMB, ligante 4,5% |
| BBTM11-PH0-5.5L | TMA 11 mm, PMB, ligante 5,5% |
| BBTM11-PH0-6.0L | TMA 11 mm, PMB, ligante 6,0% |

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Rigidez Dinámica de mezclas SMA.

Se han ensayado las mezcla bituminosa tipo SMA incluidas en la Tabla1. Para cada mezcla se han obtenido cuatro espectros de rigidez dinámica, uno por probeta ensayada. En la Figura 3 se muestran los espectros de rigidez dinámica de varias de las mezclas estudiadas. Los resultados se representan en un intervalo de frecuencias hasta 500 Hz [5].

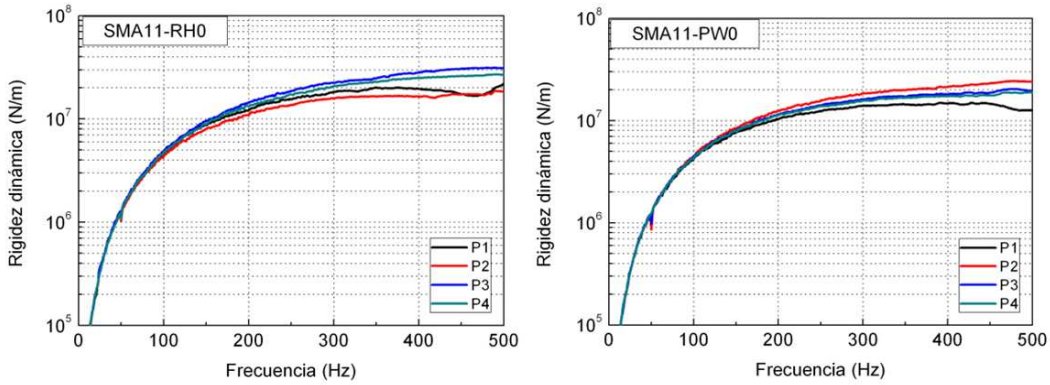



Figura 3. Espectros de Rigidez dinámica

De los espectros mostrados en las figuras anteriores, se ha seleccionado el valor de la rigidez dinámica a la frecuencia de 400 Hz, ya que esta frecuencia puede estar relacionada con los niveles de ruido de rodadura, de acuerdo a la bibliografía consultada [6, 7]. De los cuatro valores de rigidez dinámica obtenidos para cada tipo de mezcla bituminosa, se eliminó el de mayor desviación estándar, y se determinó la media y los valores de error del resto de probetas. En la Figura 4 se muestran estos valores medios y las barras de error resultantes. Los resultados se muestran por grupos, comparando distintas características de las mezclas:

- Tamaño máximo de árido: 8, 11 y 16 mm
- Tipo de ligante: PMB, convencional y con NFU por vía húmeda
- Temperatura de fabricación: Caliente, templada y fría
- Contenido de RAP: 0%, 10% y 20 %
- Contenido en huecos: 4,4% y 20,3%
- Contenido en ligante: 6% y 9%

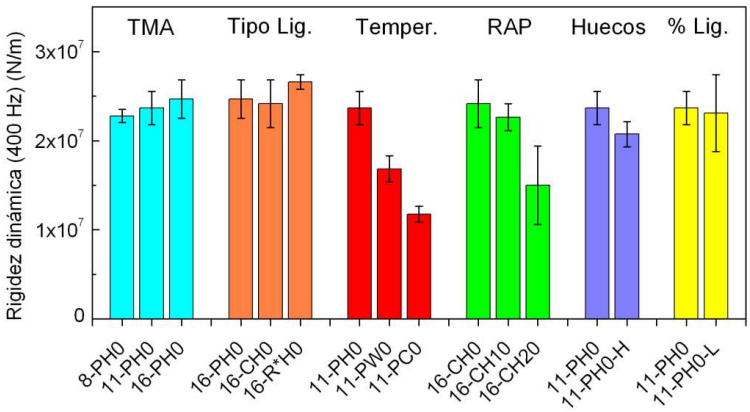



Figura 4. Espectros de Rigidez dinámica

Como se muestra en la figura, el tamaño máximo de árido (TMA) parece no tener un papel determinante en el incremento de la rigidez dinámica de las probetas. Para TMA inferiores (8 mm) se obtiene una rigidez dinámica menor, sin embargo, esta mezcla (SMA8 – PH0) tenía un alto contenido en huecos, el cual podría reducir la rigidez. Tampoco se pueden obtener resultados concluyentes en el caso de la comparación por tipo de ligante, aunque de acuerdo a los resultados mostrados las mezclas con polvo de caucho añadido por vía húmeda parecen más rígidas.

En la comparación de las mezclas considerando como variable la temperatura de ejecución sí que se pueden obtener resultados interesantes, ya que se observa una clara relación entre las mezclas fabricadas a menor temperatura y el descenso de la rigidez dinámica de las mismas. Una dependencia similar se ha encontrado en el caso de las mezclas fabricadas con material reciclado; las mezclas con mayor porcentaje de RAP son las que menor rigidez presentan. Este comportamiento se ha observado también al aumentar el porcentaje de huecos en mezcla: a mayor contenido en huecos, menor rigidez dinámica.

Por último, de acuerdo con los resultados mostrados, el incremento en el porcentaje de ligante podría llevar a una reducción de la rigidez dinámica, sin embargo, en este caso el error obtenido en las mediciones es tan elevado que no permite establecer conclusiones en este sentido.

**Relación entre rigidez Dinámica y contenido de ligante en mezclas BBTM 11A.**
Además de las mezclas SMA, también se han estudiado probetas de mezcla discontinua tipo BBTM con el objetivo de evaluar cómo afecta el contenido de ligante en la rigidez dinámica de este tipo de mezclas bituminosas (Figura 5). En este caso el procedimiento ha sido similar al llevado a cabo con las mezclas SMA. Este estudio permitirá establecer si existe alguna relación entre el contenido de ligante y la rigidez dinámica; relación que no se ha podido establecer de forma definitiva con las mezclas SMA.

En el caso de las mezclas BBTM con betún modificado con polímeros (BBTM11-PH0) parece que el incremento en el contenido de ligante puede llevar a un aumento de la rigidez dinámica. De acuerdo a los resultados mostrados, la rigidez dinámica aumenta cuando se incrementa el porcentaje de ligante en mezcla, sin embargo, este incremento debe tener un máximo, a partir del cual la rigidez dinámica debe caer si se sigue aumentando el porcentaje de ligante en mezcla. En los ensayos realizados sobre la mezcla BBTM11-PH0 no se ha llegado hasta este máximo en el contenido de ligante, tal y como se observa en la Figura 5.

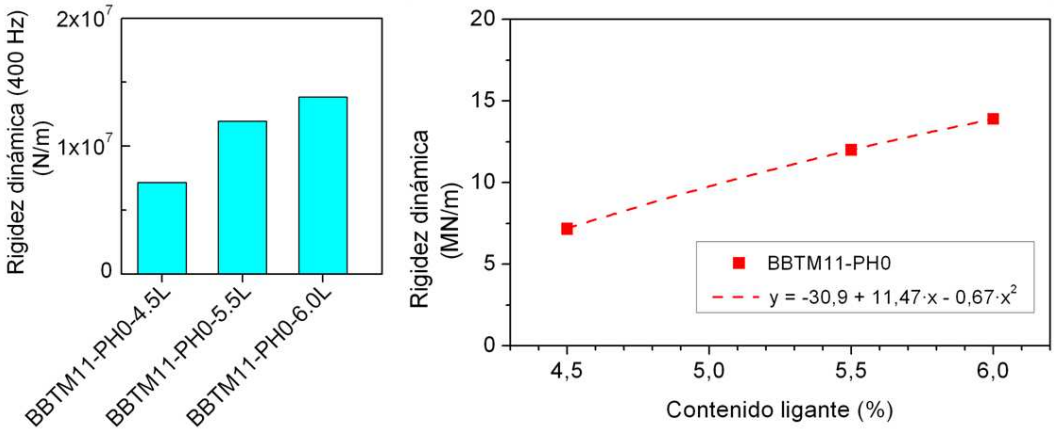



Figura 5. Rigidez dinámica a 400 Hz de mezclas BBTM 11A (izquierda) y relación con el contenido de ligante (derecha).

**Relación medidas in situ y sobre testigos.**

Se han realizado medidas de rigidez dinámica *in situ*, sobre un tramo experimental situado en la localidad de Tomelloso (CM-3102). En este caso la mezcla estudiada fue una mezcla discontinua tipo BBTM 11A con tamaño máximo de árido 11 mm y betún de alta viscosidad con alto contenido en polvo de caucho añadido por vía húmeda (BBTM 11A NFU). Por otro lado, se extrajeron varios testigos cilíndricos en los puntos exactos donde se realizaron los ensayos de rigidez dinámica, con el fin de comparar los resultados obtenidos *in situ* y en laboratorio sobre testigos. Los testigos fueron posteriormente cortados y adaptados a la geometría de las probetas ensayadas en laboratorio.

Además de los ensayos realizados sobre la mezcla bituminosa discontinua BBTM 11A NFU, se realizaron mediciones sobre un tramo de referencia [8], en este caso con una mezcla de similares características (BBTM 11A) pero con betún convencional, sin polvo de caucho (REFERENCIA). Los resultados obtenidos en cada tipo de mezcla permitirán establecer la relación existente entre los valores de rigidez dinámica obtenidos *in situ*, y los obtenidos sobre probetas para este tipo de mezclas. En la Figura 6 (izquierda) se muestran los resultados obtenidos.

Es interesante destacar la presencia de saltos en el espectro de rigidez dinámica para algunas frecuencias (medidas en testigos). Estos saltos pueden deberse a las condiciones de apoyo de la probeta/testigo y a la existencia de resonancias a determinadas frecuencias que podrían alterar los valores reales a esas frecuencias.

Como conclusión, es más adecuado realizar ensayos de rigidez dinámica *in situ* que sobre probetas, aunque en la mayoría de los casos los ensayos *in situ* no se podrán llevar a cabo por la dificultad y el tiempo que conlleva su ejecución (cortes de tráfico, fijación del equipo).

A partir de los resultados obtenidos *in situ* y sobre testigos (tomados en los puntos exactos donde se realizaron los ensayos *in situ*), se puede hacer una comparación entre ambos valores medidos sobre mezclas bituminosas en caliente. Esta comparación se ha realizado para los valores de rigidez dinámica a 400 Hz, que es la frecuencia que se ha tomado en los apartados anteriores para el estudio de la rigidez dinámica (Figura 6 derecha).

A partir de los resultados mostrados en la figura anterior se observa que los valores de rigidez dinámica obtenidos en los ensayos *in situ* son notablemente superiores a los valores obtenidos en los ensayos sobre probetas. Este comportamiento debe ser debido a la restricción que impone al movimiento el conjunto de la superficie de la carretera al ser solicitada durante los ensayos. Sin embargo, en el caso de las probetas, la falta de confinamiento lateral puede llevar a un mayor desplazamiento de la superficie, y por tanto, a una reducción de la rigidez dinámica. Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos, puede establecerse una relación empírica entre los resultados obtenidos sobre probetas e *in situ*, para este tipo de materiales (mezclas bituminosas BBTM 11A).

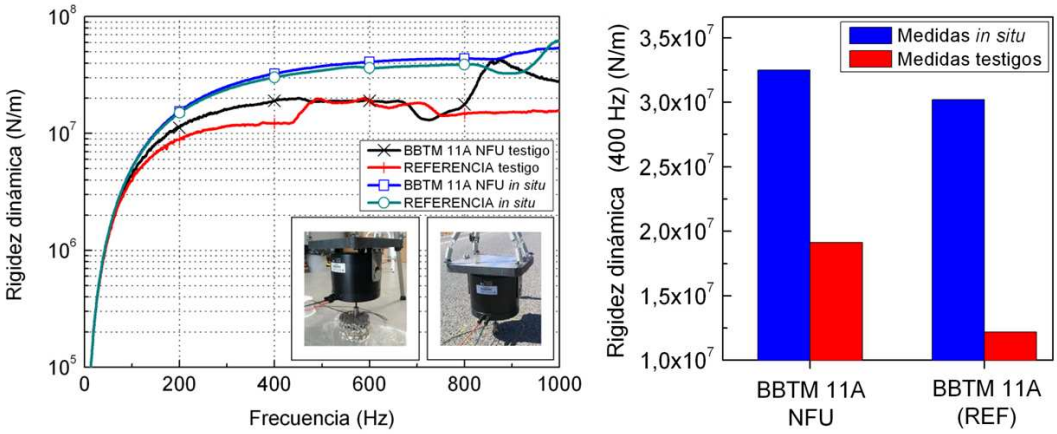



Figura 6. Rigidez dinámica *in situ* (izquierda) y comparación entre las medidas de rigidez dinámica *in situ* y sobre probetas (derecha).

**Estimación del módulo de Young de mezclas bituminosas.**

Además de la determinación del espectro de rigidez dinámica de los materiales anteriores, el equipo excitador de vibraciones y la cabeza de impedancia permiten la estimación del módulo de Young (*E*) a partir del ajuste basado en un modelo teórico [9]. En la Figura 7 se muestra el ajuste realizado para la mezcla SMA8–PH0.

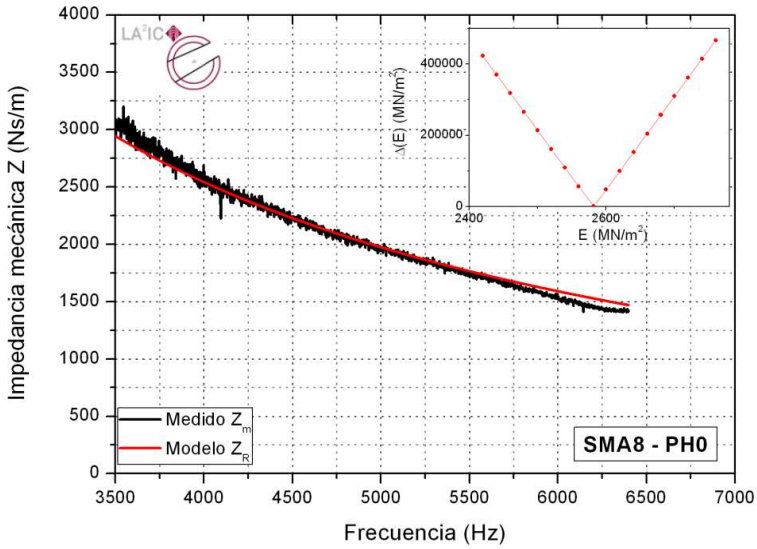



Figura 7. Ajuste del espectro de impedancia mecánica para la estimación del módulo de Young.

Mediante el ajuste de la curva de rigidez dinámica y el valor estimado teóricamente, se obtienen los valores de *E* en cada tipo de mezcla (4 probetas). Al igual que para los valores de rigidez dinámica, se ha eliminado el valor más distanciado de la media de cada juego de probetas, quedando los resultados que se muestran en la Figura 8.

Los resultados mostrados en la Figura 8 se han comparado con los obtenidos de acuerdo a la norma UNE-EN 12697-26 sobre *Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez*, comprobándose que existe una buena relación entre los valores obtenidos mediante la norma y los obtenidos mediante el modelo teórico.

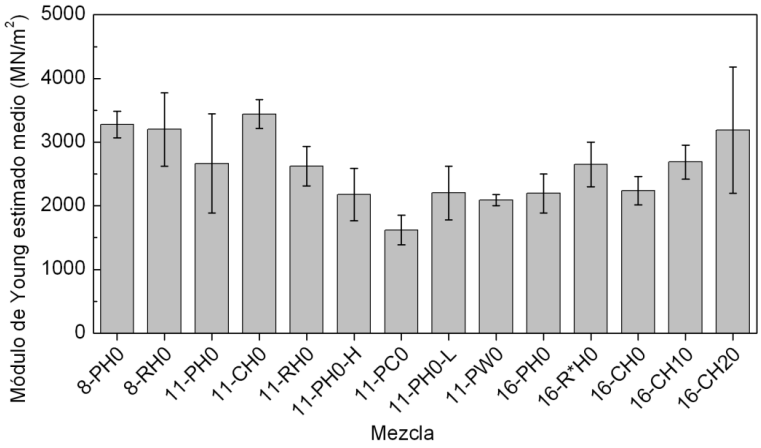


Figura 8. Valores estimados medios del módulo de Young y desviación típica.

## CONCLUSIONES

La rigidez dinámica es una característica de las mezclas bituminosas que puede tener cierta relevancia en la generación de ruido de rodadura, especialmente en el caso en los que se consigue reducir su valor de forma importante. De acuerdo a los datos mostrados, la temperatura de fabricación de las mezclas bituminosas es la característica que más puede influir sobre la rigidez dinámica final del pavimento. Por otro lado, se ha observado la relación existente entre el contenido en ligante de la mezcla y su rigidez dinámica, de una mezcla tipo BBTM 11A, aunque no se ha obtenido el porcentaje de ligante que hace máxima la rigidez dinámica. Se han obtenido valores de rigidez dinámica en condiciones *in situ*, mostrando valores mayores y más representativos que los obtenidos sobre probetas. Por último, se ha aplicado un modelo para la determinación del módulo de Young a partir de los ensayos de rigidez dinámica, con resultados satisfactorios.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y a los fondos FEDER, dentro del marco del proyecto BIA 2012-32177 y a la Conserjería de Ciencia y Tecnología de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (Proyecto PPII-2014-012-A).

## REFERENCIAS

[1] K.P. Biligiri, B. Kalman, A. Samuelsson. *Understanding the fundamental material properfies of low-noise poroelastic road surfaces*. International Journal of Pavement Engineering, 14 (2013), 13-23.

[2] U. Sandberg, J.A. Ejsmont, *Tyre/road noise reference book*, Informex, Sweden, (2002).

[3] Lauge Fulgsang Nielsen, *Improved method for complex modulus stimation.* Brüel & Kjaer application note.

[4] V.F. Vázquez, S.E. Paje, *Caracterización de mezclas bituminosas mediante diferentes técnicas de ensayo: Rigidez dinámica mediante diferentes técnicas de ensayo: Rigidez dinámica, CPX y Absorción acústica*. TecniAcústica (2013), Valladolid.

[5] V.F. Vázquez, *Evaluación de la Rigidez Dinámica y Caracterización Acústica de Mezclas Bituminosas,* PhD thesis, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (España), (2015).

[6] A.H.W.M. Kuijpers, W. Schwanen. *Development of a measurement system for mechanical impedance*. Silvia Project Report (2005).

[7] Mingliang Li. *Tyre – Road noise, Surface Characteristics and material properties*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft (Holandan), (2013).

[8] V.F. Vázquez, F. Terán, U. Viñuela, S.E. Paje. Study of a road test track with and without crumb rubber. Solutions for noise pollution. Environmental Engineering and Management Journal, 13 (2014), 2487-2495.

[9] Huebelt, J. Lindemann, U. Zander, F. Wellner. *Young's Modulus and Mechanical Impedance of Road Pavements*. InterNoise (2013) Innsbruck.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# NUEVOS FIRMES RECICLADOS: GENERACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

PACS: 43.50.Lj

Paz Núñez, Francisco; Terán Sierra, Fernando J.; Fernández Vázquez, Victoriano; Huertas Gallardo, Pedro; Expósito Paje, Santiago
Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad de Castilla-La Mancha.
Avda. Camilo José Cela s/n 13071 Ciudad Real, España
Tel: 926 295 300
E-mail: francisco.paz@uclm.es

## ABSTRACT

Re-using construction materials that have lost their initial characteristics and recycling of waste materials are one of the goals of the construction of new roads, from an environmental point of view. Besides, these new surfaces have to ensure the same structural and functional characteristics of any new road built from virgin materials, such as comfort and safety of users. On the other hand, tire/road noise is one of the main environmental problems, principally in big cities. This paper studies the tire/road noise generated by wearing courses built with high percentages of Reclaimed Asphalt Pavement and compares their behavior with that of conventional wearing courses.

## RESUMEN

Uno de los principales objetivos en la construcción de firmes, desde el punto de vista medioambiental, es el reciclado de materiales de desecho, y/o la reutilización de otros que han perdido sus características iniciales, todo ello conservando las propiedades estructurales y funcionales para los que fueron construidos, como el confort y seguridad para el usuario y demás ciudadanos. El ruido que transmite la interacción neumático/pavimento, sobre todo en grandes aglomeraciones, es otro de los problemas medioambientales fundamentales. Este trabajo estudia el ruido producido por firmes reciclados con alta tasa de reutilización, y su comparación con los pavimentos tradicionales.

## TRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos del programa Europa Horizonte 2020 es que se utilicen de forma racional y eficaz todos los recursos para generar un crecimiento sostenible e integrador. Existe en la actualidad un gran marco normativo y legislativo sobre la generación, utilización y vertido de todo tipo de residuos, tanto a nivel Europeo (Reglamento CE 305/2011), como a nivel nacional, la Ley 10/1998 de residuos en la que se define el marco general para el tratamiento de residuos generados por la sociedad y en la que fija un criterio básico contemplado en su artículo 1.1, se trata de PREVENIR en la manera de lo posible, REUTILIZAR lo que se pueda, RECICLAR lo que no se pueda utilizar y VALORIZAR energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar.

La construcción en general, así como el mantenimiento y reposición de firmes de carreteras generan una gran cantidad de residuos de obra, en particular el procedente del fresado de las capas bituminosas envejecidas y deterioradas de los pavimentos de las carreteras, también llamado RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), el reciclado y/o la reutilización de este material es necesario no solo por meras cuestiones medioambientales sino que además existen otras muchas razones de orden técnico, económico e incluso social que permiten e implican a un imprescindible reaprovechamiento de estos materiales.

Desde hace aproximadamente unos 30 años se están estudiando y analizando las técnicas del reciclado de pavimentos bituminosos de los firmes de las carreteras superándose en la actualidad la mayoría de las dificultades técnicas y prácticas, empleándose diversos modos para su reutilización, en frio, en caliente, in situ, en central. Con más o menos tasa de reutilización del RAP. Pero las nuevas capas de firme reconstruidas con estos materiales, deben seguir manteniendo e incluso mejorando las características funcionales de las capas iniciales en cuanto a capacidad estructural, y de seguridad y confort para todos sus usuarios.

Una de las características fundamentales que tienen en cuenta las sociedades modernas es el ruido. El ruido es un tipo de contaminación que no se acumula como los residuos convencionales con los que estamos familiarizados, sino que es una forma de energía que se disipa tras un corto periodo de tiempo. Esta característica es la principal responsable de que tradicionalmente no se hayan establecido límites a las emisiones sonoras. Actualmente, la existencia de fuentes continúas de ruido como las infraestructuras del transporte (carreteras y autovías con tráfico continuo) han hecho que se revisen y adapten las legislaciones, estableciendo cotas máximas a la generación sonora en zonas urbanas o rurales según el uso al que están destinadas dichas áreas. Desde los años 80 ya existen precedentes de normativas de ámbito nacional e internacional, sin embargo, en España no se dispone de una legislación de ámbito estatal hasta 2003 [1], donde se busca prevenir y reducir la contaminación acústica siguiendo la idea que se recoge en la directiva europea de 2002 [2].

En el caso particular de las vías de comunicación, existen diferentes fuentes de generación de ruido provocadas por la circulación de un vehículo sobre la carretera. Entre las distintas fuentes, el ruido de rodadura es predominante para velocidades de circulación superiores a 40 km/h, es decir, para la mayoría de vías urbanas e interurbanas. Es por ello que es de gran importancia el conocer los distintos mecanismos de generación del ruido de rodadura, así como la participación en la emisión sonora total de cada uno de ellos y el modo de actuar con el fin de reducir este tipo de contaminación.

Este trabajo se centra en el estudio de las características superficiales de los nuevos pavimentos realizados con el reciclado y/o la reutilización de los materiales fresados y procedentes del pavimento antiguo ya deteriorado. Así como en la generación del ruido que la iteración neumático/pavimento del tráfico rodado provoca en estos nuevos firmes reciclados. Para ello se han realizado numerosas medidas y toma de datos en obras realizadas ensayando con el remolque Tiresonic Mk4 LA$^2$IC. Por otro lado, se han realizado ensayos de absorción acústica y macrotextura, con el fin de determinar las diferencias existentes entre las mezclas bituminosas convencionales y las nuevas con material reciclado. Los resultados permitirán determinar según la composición y características de las mezclas, su repercusión en el ruido de rodadura.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Existen varias técnicas para la caracterización acústica de mezclas bituminosas. El Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA$^2$IC) cuenta con varios equipos, como son el Tiresonic Mk4 LA$^2$IC (Figura 1), o el LaserStaticPG-LA$^2$IC (Figura 2). Dichos equipos tienen como objetivo la determinación del ruido de rodadura mediante la metodología CPX [3-7] y la textura del pavimento, respectivamente [8]. La disposición de los equipos y el método de trabajo permiten la realización de los ensayos de modo simultáneo, gobernando los equipos desde dos ordenadores independientes. El equipo también registra la velocidad instantánea del vehículo de ensayo mediante un tacómetro directamente conectado al analizador, así como su posicionamiento mediante coordenadas GPS. El LA$^2$IC también cuenta con un tubo de impedancia con el que se estudia el efecto de la impedancia acústica sobre la generación de

ruido de rodadura. Este efecto está encuadrado dentro de los mecanismos relacionados con la amplificación o reducción del ruido de rodadura, de acuerdo con la clasificación de Sandberg y Ejsmont [9].

**Tiresonic Mk4-LA$^2$IC**

Consiste en un remolque con una cámara semianecoica en cuyo interior se monta un neumático de referencia tipo Pirelli P6000. En las cercanías del neumático se disponen dos micrófonos, a una distancia y ángulo determinados respecto del neumático y de la superficie del pavimento. Todos los posibles elementos reflectantes dentro de la cámara semianecoica van recubiertos con material aislante, de modo que se eviten reflexiones indeseadas. El equipo registra los niveles de presión sonora generados en la interacción neumático/pavimento cada 0,2 segundos, en bandas de tercio de octava con ponderación A y en el intervalo de frecuencias comprendido entre 200 Hz y 5 kHz.




Figura 1. Tiresonic Mk4 LA$^2$IC

**LaserDynamicPG-LA$^2$IC**

Este equipo está compuesto por un perfilómetro láser que permite el registro de datos para el cálculo del perfil de textura de una superficie de manera dinámica y la obtención de parámetros de la carretera como la MPD (Profundidad Media del Perfil) de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 13473-1 [8] o el IRI (Índice de Regularidad Internacional). El equipo tiene unas dimensiones reducidas, lo que facilita su instalación. Está diseñado para colocarse en el exterior del vehículo, orientado hacia la superficie que se desea estudiar. También permite la obtención de datos geo-referenciados, ya que registra las coordenadas GPS de forma continua durante la medición. En la Figura 2 se muestra la disposición del perfilómetro láser en la parte delantera del vehículo. El PC desde el que se gobierna el equipo se sitúan en el interior del vehículo.




Figura 2.- Detalle del perfilómetro Laser del equipo LaserDynamicPG-LA$^2$IC.

**Tubo de Impedancia**

Para la realización de las medidas de absorción acústica se ha empleado el método del tubo de impedancia o tubo de Kundt (Figura 3) [13]. Este método permite determinar el coeficiente de absorción (α) de las mezclas bituminosas. El método de ensayo emplea un tubo de impedancia con una fuente sonora en uno de sus extremos y la muestra ensayada en el extremo opuesto. El intervalo de frecuencias estudiado con este equipo es el comprendido entre 50 Hz y 1,6 kHz.



Figura 3. Tubo de impedancia

**ZONA Y MATERIALES ESTUDIADOS.**

El RAP es el material procedente del fresado de las capas bituminosas de un firme deteriorado o envejecido, este producto está constituido por materiales de alto valor técnico y económico que hace adecuado su reciclado y reutilización. Si el RAP procede de materiales utilizados en capa de rodadura o intermedia, la calidad de estos materiales hace deseable su reutilización en capas con la misma funcionalidad para aprovechar al máximo el valor de los mismos, característica esta no necesaria si se destina a mezclas recicladas para capas de base. La solución adecuada sería la de reutilizar el RAP generado en la propia capa de reposición, evitando residuos o excedentes que podrían destinarse a empleos con menos valorización.

En España el estudio y características técnicas de los materiales y unidades de obras utilizados en los reciclados de firmes bituminosos, vienen recogidos en los Pliegos de Prescripciones Técnicas y las Normas de la Dirección General de Carreteras [14,15 y 16].

Las mezclas reutilizables en la reposición, y que puedan incorporar RAP, pueden ser ejecutadas *in situ* o en central y a su vez pueden ser recicladas en caliente en planta. No obstante, su tasa de reciclado está limitada (Según la normativa anterior a un 50-60% como máximo) y no permiten un reciclado total, por lo que no es posible con esta técnica volver a colocar en la misma capa todo el RAP generado. Hay otras técnicas, con capacidad para producir mezclas con tasa total de reciclado, como son las de reciclado en frío *in situ* con emulsión bituminosas que sí permiten la utilización del RAP en altas tasas o con reciclado total de la mezcla; sin embargo también presentan algunas limitaciones técnicas y estructurales (curado y resistencia) en los inicios tras su puesta en obra, aunque son indudables sus ventajas de tipo medioambiental.

Esta última técnica es la que se ha utilizado en la zona de estudio donde se ha realizado la toma de datos y auscultación de los trabajos realizados, siendo esta la Carretera Provincial CM-412, entre los PK 0,0 y 11,00, perteneciente a la Junta de Comunidades de Castilla-la Mancha en la provincia de Ciudad Real. En la que se ha realizado un reciclado en frio, *in situ* con emulsión bituminosa, en adelante RFE, en una profundidad media de 10 cm, para su posterior utilización como capa de base, y un posterior refuerzo con dos capas de mezcla bituminosa convencional.

**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

**Ruido de rodadura**

Se han realizado mediciones y toma de datos sobre la carretera anteriormente mencionada, antes de la realización de los trabajos de reciclado, para evaluar el estado de deterioro del firme antiguo y así poder comparar los resultados con el nuevo materia ya reciclado.

De los datos obtenidos se puede observar el gran deterioro y desgaste que tiene este firme antiguo. Se obtienen valores del nivel sonoro asociado al ruido de rodadura $L_{CPtr}$ muy altos, medidos en decibelios A, siendo estos de 93,7 dB(A) para una velocidad media de 50 km/h y de 101,3 dB(A) para una velocidad media de 80 km/h, ambos valores con las correcciones por temperatura ya realizadas (Figura 4).

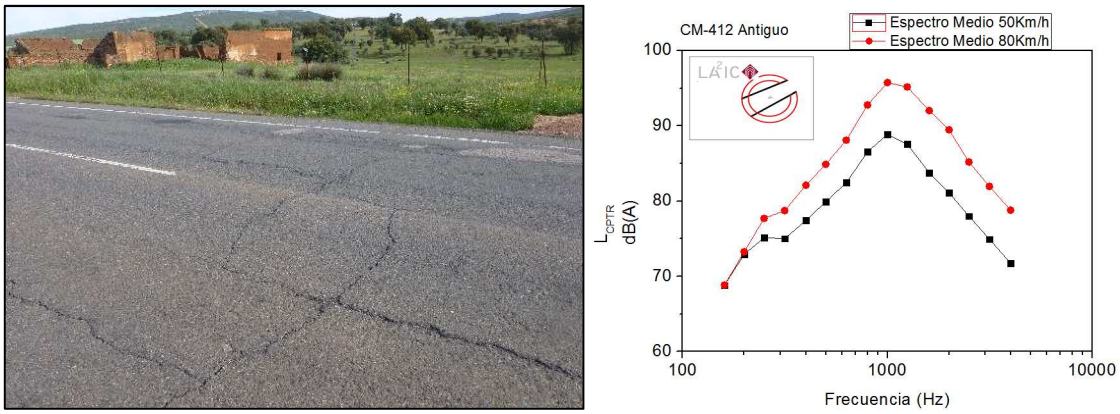



Figura 4.- Firme CM-412 deteriorado (izquierda) y espectro $L_{CPtr}$ de esta vía (derecha)

Posteriormente se volvieron a tomar el mismo tipo de datos pero con el firme ya reciclado. Obteniéndose unos valores medios más suaves y correctos que nos indican una regularidad superficial buena en el firme ya reciclado. Estos valores fueron de 85,5 dB(A) para una velocidad media de 50 km/h y de 94,2 dB(A) para una velocidad media de 80 km/h (Figura 5).

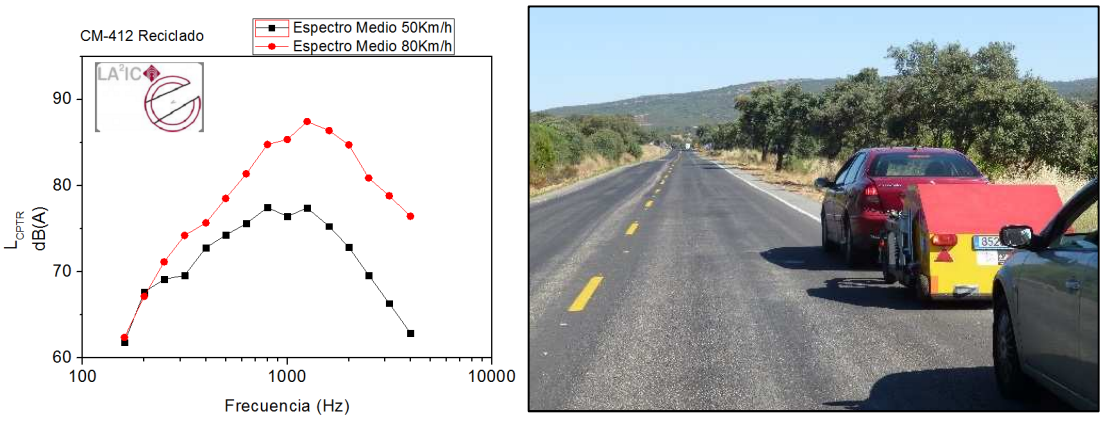



Figura 5.- Espectro $L_{CPtr}$ de la vía CM-412 reciclada (izquierda) y detalle de la vía (derecha)

Además se tomaron datos de la capa de reciclado en distintos tramos, que se ejecutaron en diferentes fechas, con el fin de poder comprobar el proceso de curado de este tipo de pavimento reciclado. Este proceso de curado, consiste en la pérdida del agua que contiene la emulsión bituminosa añadida al RAP en el proceso de reciclado y reutilización del material fresado, este proceso termina cuando se alcanza un nivel estable de humedad en el firme. En ellos se puede apreciar que el nivel sonoro es aproximadamente 1 dB mayor en el pavimento ya seco (Figura 6, izquierda).

Posteriormente, para comparar y tomar como referencia el nivel de ruido en una capa de rodadura convencional (Figura 6, derecha), se realizó también una medición sobre un tramo ejecutado un año antes en la misma carretera, con el mismo procedimiento de reciclado pero con el pavimento ya totalmente terminado y con una capa de rodadura realizada con un hormigón bituminoso tipo AC 16 S. en este tramo el tráfico rodado ya lleva un año en circulación y se aprecia que el nivel global del ruido producido es aproximadamente 2 dB mayor que en el tramo actual, este efecto es mayor en las altas frecuencias (más de 1000 Hz) y menor en las bajas frecuencias.

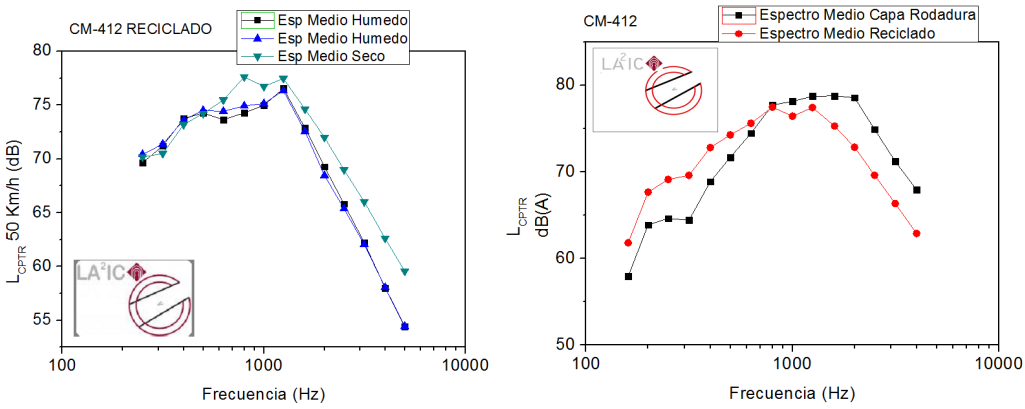



Figura 6.- Espectro del firme Reciclado (CM-412) en distintos momentos durante el curado (izquierda) y Comparación entre la capa de rodadura (AC 16 S) y la mezcla reciclada (derecha)

**Tubo de Impedancia**

Mediante el tubo de impedancia se han ensayado probetas fabricadas en laboratorio con mezcla con tasa total de material reciclado RAP (Figura 7). Los resultados de absorción acústica se han comparado con los obtenidos con dos mezclas del tipo BBTM 11A: una primera mezcla fabricada con betún convencional, y otra fabricada con polvo de caucho (betún BMAVC) (Figura 7). Como se observa en la figura, el comportamiento de ambas mezclas no tiene grandes diferencias, encontrándose por debajo de 0,2 en la mayor parte del espectro. Destaca la absorción de la mezcla reciclada en las altas frecuencias, por los valores más elevados de absorción, aunque este comportamiento no debe tener gran relevancia en el ruido generado por la interacción neumático/pavimento.

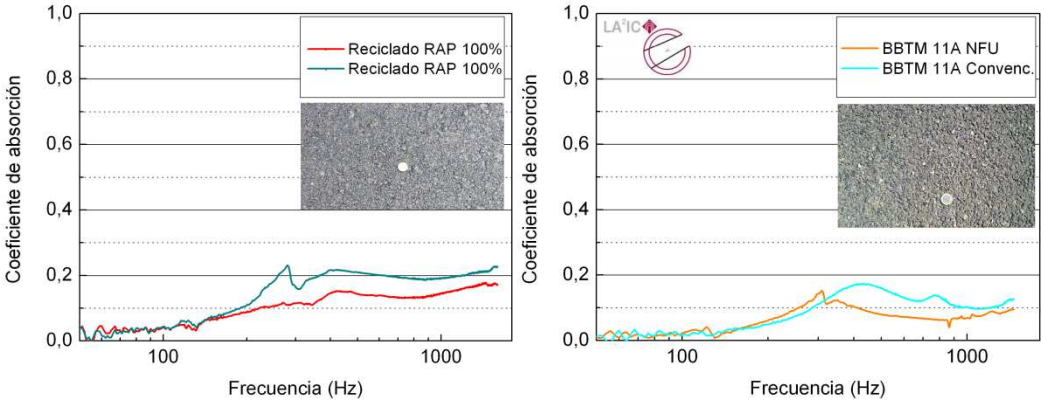



Figura 7. Coeficientes de absorción de las mezclas recicladas (izquierda) y de mezclas convencionales del tipo BBTM 11A (derecha)

**Macrotextura superficial**

En este apartado se compara la macrotextura superficial de las mezclas fabricadas con alta tasa de material recuperado (RAP) y las mezclas convencionales BBTM 11A incluidas en el apartado anterior sobre absorción acústica.

Como se observa en la Figura 8, la mezcla fabricada en frío, con una tasa de material reciclado del 100%, no tiene una MPD muy superior a la obtenida en otras mezclas como las que se muestran en la figura (mezcla BBTM 11A convencional y con polvo de caucho). Sin embargo, la MPD de este tipo de mezclas recicladas tiene una gran variabilidad dependiendo del punto donde se realiza la medición, si se compara con los valores obtenidos para los otros dos tipos de mezclas bituminosas. Este tipo de mezclas no están diseñadas para ser usadas como capas de rodadura, por lo que se justifica este comportamiento, sin embargo, si se desea emplearlas como este tipo de capas, sería necesario optimizar su macrotextura.

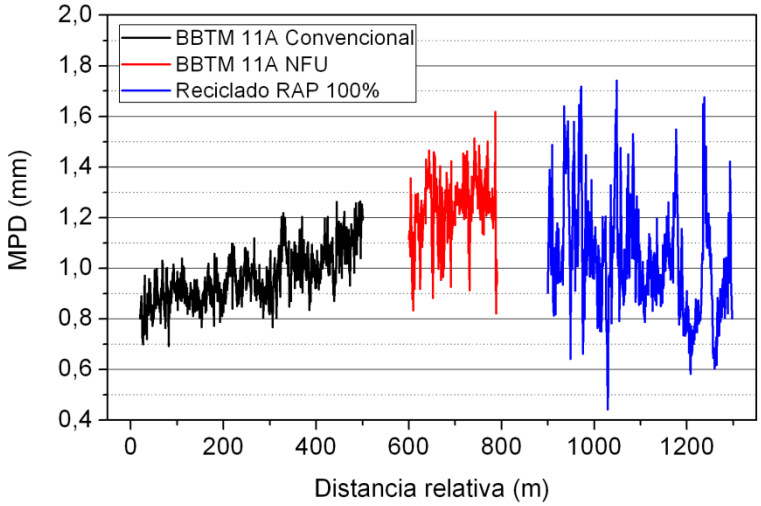



Figura 8. Comparación entre la MPD de varias mezclas bituminosas: Mezclas BBTM 11A y mezclas en frío con material reciclado RAP en un contenido del 100%

## CONCLUSIONES

La técnica de reciclado de pavimentos bituminosos en frio RFE con la adición de emulsiones específicas y adaptadas al material procedente del fresado es una técnica con mucho potencial de empleo por sus grandes cualidades técnicas, económicas y medioambientales.

Dentro de las características superficiales que aportan este tipo de firmes reciclados, se encuentra la de proporcionar un menor nivel sonoro al efecto de generación de ruido entre neumático y pavimento en unos niveles de aproximadamente unos 2 dB(A), que hacen factible su clasificación como pavimentos sonoreductores de acuerdo a la clasificación que hace de ellos el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil de la universidad de Castilla la Mancha [17].

Se observa también como va aumentando el nivel sonoro a medida que se va curando la mezcla reciclada y va perdiendo humedad, esto también hace que la mezcla este viva y tenga mayores deformaciones e irregularidades. Estos mecanismos que afectan a la textura superficial (MPD) pueden ser los responsables de los mayores niveles sonoros mostrados en el espectro medio de la Figura 6, derecha, para las bajas frecuencias, y sin embargo se produce un menor ruido en medias frecuencias que es debido a la menor rigidez de este tipo de mezclas recicladas en comparación con una mezcla convencional [18].

Debido a esto último y a otras características técnicas y estructurales hacen que este tipo de Mezclas no se utilicen para capas de rodadura, salvo en excepciones para caminos de baja intensidad de tráfico y solo se utilicen para capas de base, perdiéndose así las buenas características del material de fresado y todas sus ventajas económicas y medioambientales. Por ello es fundamental seguir trabajando en el desarrollo técnico y de puesta en obra de este tipo de mezclas con el fin de mejorar su comportamiento estructural y superficial (optimización de la MPD) que proporcione el confort y seguridad de una capa de rodadura.

## AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo se ha contado con la financiación de la Consejería de Ciencia y Tecnología de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha a través del proyecto PPII-2014-012-A. “Utilización de materiales de desecho en mezclas asfálticas: aplicaciones acústicas, eléctricas y electromagnéticas” y con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y fondos FEDER, dentro del marco del proyecto BIA 2012-32177. También se agradecer a la delegación Provincial de la Consejería de Fomento de la JCCM en Ciudad Real, a su jefatura de Carreteras y a su Laboratorio de Control de Calidad por la ayuda recibida para la elaboración de este trabajo.

**REFERENCIAS**


[1] *Ley 37/2003, de Ruido,* de 17 de noviembre de 2003 (Boletín Oficial del Estado num. 276)

[2] Directiva 2002/49/CE de 25 de junio de 2002 *sobre evaluación y gestión del ruido ambiental*

[3] R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, O. Reyes, S.E. Paje, M. Bueno, *Effect of crumb rubber bituminous mixes on functional characteristics of road pavements.* Transportation Research Record 2126 (2009) 83-90

[4] S.E. Paje, M. Bueno, U. Viñuela, F. Terán, *Toward the acoustical characterization of asphalt pavements: Analysis of the tire/road sound from a porous surface (L).* J. Acoust. Soc. A. 125, 2009

[5] S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, *Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber.* Applied Acoustics 71 (2010) 578-582

[6] M. Bueno, J. Luong, U. Viñuela, F. Terán, S. E. Paje, *Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise,* Applied Acoustics 72 (2011) 829-835

[7] S.E. Paje, J. Luong, V.F. Vázquez, M. Bueno, R. Miró, *Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: influence on noise reduction,* Construction and Building Materials 47 (2013) 789-798

[8] S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán, U. Viñuela, J. Luong. *Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets.* J. Acoust. Soc A, 123 (2008), 1439-1445

[9] U. Sandberg, J.A. Ejsmont. *Tire/Road Noise Reference Book.* Ed. Informex (Suecia 2002)

[13] Norma UNE-EN ISO 10534-2 *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia*

[14] Dirección General de Carreteras, Mº Fomento: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes" PG-3. 2004. Y su Nueva revisión de 3-1-2015

[15] Dirección General de Carreteras, Mº Fomento: Norma 6.3-I.C. "Rehabilitación de firmes" 28 de Noviembre, 2003.

[16] Dirección General de Carreteras, Mº Fomento: "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras" PG-4. 18 de enero de 2002.

[17] S.E. Paje, M. Bueno, M.Arana "Innovación para el control del ruido ambiental" Universidad de castilla la Mancha .2013

[18] V.F. Vázquez, *Evaluación de la Rigidez Dinámica y Caracterización Acústica de Mezclas Bituminosas,* PhD tesis, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (España), (2015).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS SONORAS DE LAS VÍAS URBANAS DE CIUDAD REAL

PACS 43.50.Lj

Terán Sierra, Fernando J.; Paz Núñez, Francisco; Fernández Vázquez, Victoriano; Huertas Gallardo, Pedro y Expósito Paje, Santiago.
Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad de Castilla-La Mancha.
Avda. Camilo José Cela s/n 13071 Ciudad Real, España
Tel: 926 295300
E-mail: Fernando.Teran@uclm.es

## ABSTRACT

This paper studies the acoustic situation of Ciudad Real, a medium size city in Castilla-La Mancha, Spain. The acoustic field characterization has been carried out by means of a ondestructive technique: the Close Proximity Method (CPX) developed and employed by the Laboratory of Acoustics Applied to Civil Engineering (UCLM). Geo-referenced tire/road noise levels are achieved through the CPX method. The main goal of this paper is to assess the urban noise pollution and its evolution between 2008 and 2015. The acoustic performance of several lanes of Ciudad Real, from rehabilitated road surfaces to old and deteriorated wearing courses, is finally presented in this work.

## RESUMEN

En esta comunicación se exponen los resultados obtenidos, a través de técnicas no destructivas de geo-auscultación sonora, mediante el método CPX, utilizado y desarrollado por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil de la UCLM. En el proceso se cuantifica el ruido producido por la interacción neumático/pavimento de forma geo-referenciada. El objetivo es evaluar la contaminación acústica producida y su evolución en el tiempo, entre 2008 y 2015, de diversas vías urbanas de Ciudad Real, tanto en vías donde se ha procedido a su rehabilitación, como en aquellas que no se ha realizado ninguna actuación de mejora.

## INTRODUCCION

En estos últimos años y debido a la crisis económica, la inversión de las administraciones en materia de conservación y mantenimiento de vías urbanas ha disminuido considerablemente y Ciudad Real es un ejemplo más. Esto ha propiciado el deterioro de los firmes y con ello el de sus características superficiales que influyen en el confort y la seguridad de todos los usuarios.
En los firmes se pueden llevar a cabo actuaciones de mantenimiento que se desarrollan de forma ordinaria, es decir, con cierta periodicidad y en las que se integran las operaciones preventivas y curativas. Y otras actuaciones extraordinarias, donde se integran las rehabilitaciones estructurales, las reconstrucciones y los reciclados. Respecto a las estrategias de conservación existen dos ampliamente conocidas, las denominadas estrategias puntuales y

las estrategias continuas. Las primeras se basan en grandes actuaciones en momentos concretos y distanciados en el tiempo. Por otro lado, la estrategia continua se basa en actividades muy frecuentes, de modo que la pérdida de las características de la vía suceda de una forma gradual.

En el viario urbano, principal elemento de este trabajo, los objetivos de las actuaciones sobre el pavimento son las expuestas anteriormente. Por otro lado, se debe buscar que las características acústicas del pavimento sean adecuadas, de modo que no se superen los límites considerados como aceptables [1, 2, 3], especialmente en las inmediaciones de ciertos equipamientos urbanos como hospitales o colegios.

Teniendo en cuenta las características del tráfico en ciudad, es decir, predominancia de turismos y ausencia del tráfico de vehículos pesados, excepto en vías principales, se podría concluir que el deterioro de las superficies de rodadura en el interior de los núcleos urbanos es más lento que el de las vías interurbanas, sin embargo, existen otros factores, no relacionados únicamente con el tráfico, que pueden conllevar un deterioro acelerado del mismo. Como ejemplo, la realización de obras de canalización y otros, dan como resultado superficies de rodadura que se deterioran con relativa facilidad.

En Ciudad Real capital, las actividades de conservación que se realizaron durante los últimos años, se repartieron al cincuenta por ciento entre las actuaciones de rehabilitación del firme y las pequeñas actividades de reparación y puesta a punto como bacheos y pintado de marcas viales. Es por ello, que se hace necesario disponer de una herramienta que permita la auscultación de la superficie del pavimento de forma rápida y sencilla, de modo que se puedan establecer los tramos que precisan una rehabilitación y una vez realizada esta, ver su durabilidad o evolución en el tiempo.

La técnica utilizada ha sido desarrollada por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil ($LA^2IC$) de la Universidad de Castilla-la Mancha (UCLM), y con ella se realiza el estudio de la evaluación del firme y el diagnóstico sobre su estado para un posterior análisis de las distintas opciones de rehabilitación. Esta técnica está basada, en una auscultación sincronizada, y sobre la misma trayectoria, del sonido generado por la interacción neumático/pavimento y del perfil longitudinal de la superficie del firme. En este proceso se cuantifica el ruido mediante el método CPX, ya utilizado en trabajos anteriores por este grupo de investigación [4,5], la textura superficial se obtiene del registro del perfil de la vía con un perfilómetro laser, que permite determinar la profundidad media del perfil y la regularidad superficial, aunque este trabajo se centrará en la cuantificación del ruido. Esta auscultación se realiza de forma geo-referenciada para posteriormente, mediante un adecuado tratamiento de datos, extraer conclusiones, realizándose con una mínima repercusión sobre el tráfico y la seguridad de la circulación vial.

La geo-auscultación se ha realizado en varias vías urbanas e interurbanas de Ciudad Real. Las primeras mediciones estudiadas se realizaron en diversas vías urbanas en el año 2008 que sirvieron para la elaboración del mapa de ruido de rodadura (50 km/h) urbano [6]. Las segundas mediciones se realizaron en el año 2013 y las últimas se han realizado en el año 2015.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Para la auscultación de los viarios de Ciudad Real se ha contado con un equipo que permite la obtención de datos geo-referenciados, con las coordenadas GPS correspondientes, de los distintos tramos auscultados. La disposición del equipo y el método de trabajo permiten la realización de los ensayos gobernando el equipo desde un ordenador. El equipo es el denominado Tiresonic Mk4 $LA^2IC$, el cual se encarga de registrar los niveles LCPtr generados por el contacto neumático pavimento. Este se ha colocado en un vehículo de ensayo, el cual circula a la velocidad deseada (Fig.1). Las características del equipo empleado en la geo-auscultación se muestran a continuación. [7]



Fig.1.- Equipo de trabajo con las dos técnicas de medida

**Tiresonic Mk4 LA2IC**

Consiste en una cámara semianecoica en cuyo interior se monta un neumático de referencia. En las cercanías del neumático se disponen dos micrófonos, a una distancia y ángulo determinados respecto del neumático y de la superficie del pavimento. Todos los posibles elementos reflectantes dentro de la cámara semianecoica van recubiertos con material aislante, de modo que se eviten reflexiones indeseadas. El equipo registra los niveles de presión sonora generados en la interacción neumático/pavimento cada 0,2 segundos, en bandas de tercio de octava con ponderación A y en el intervalo de frecuencias comprendido entre 200 Hz y 10 kHz. El equipo también registra la velocidad instantánea del vehículo de ensayo. El registro de la velocidad es necesario para poder comparar los resultados obtenidos para las distintas superficies a la misma velocidad. En la (Fig.2) se muestra el equipo Tiresonic Mk4–LA$^2$IC.



Fig.2.- Equipo Tiresonic Mk4 LA$^2$IC

Como se ha expresado en la Introducción, además del Tiresonic Mk4 – LA$^2$IC el coche lleva acoplado el LaserDynamicPG –LA$^2$IC realizándose la auscultación del ruido de rodadura y de la textura de forma simultánea, permitiendo asegurar que los datos obtenidos se corresponden con la misma trazada sobre la superficie de la vía. De este modo las irregularidades o singularidades de la superficie auscultada quedan reflejadas en los registros de ambos equipos.

El vehículo de ensayo queda definido por tanto por un texturómetro láser en la parte frontal del mismo, mientras que en la parte trasera se engancha el remolque encargado de la medición del ruido de rodadura. Ambos equipos están situados sobre el eje central del vehículo de ensayo. La configuración final del equipo Tiresonic & LaserDynamic en línea (Fig.3).



Fig.3.- Los dos equipos en línea

**ZONA DE ESTUDIO**

Se han estudiado algunas vías urbanas de Ciudad Real capital. Los tramos son la avenida de los Descubrimientos, en los alrededores del Campus Universitario, donde ya se tomaron datos en el 2008 y posteriormente se procedió, en 2012, a una reparación solo en el carril derecho de vehículos lentos, mediante un cajeo con restitución total del firme por deterioro del antiguo y falta de capacidad estructural, sustituyendo la capa de base de zahorra artificial y del pavimento con dos capas de mezcla bituminosa y capa de rodadura (Fig.4).



Fig.4.- Vista del tramo Avd. de los Descubrimientos II

El tramo urbano de la salida a la carretera de Porzuna donde se realizó en 2014 una reparación con fresado y refuerzo de dos capas Fig.5. La primera capa de 6 centímetros, consistente en una mezcla bituminosa y una segunda capa de rodadura. De este tramo se disponen de datos de años anteriores a la actuación.



Fig.5.- Vista del tramo salida a la carretera de Porzuna

Por último, varios tramos de las rondas de Ciudad Real, que siguen con el firme antiguo (no se han realizado actuaciones en los últimos años) compuesto por mezcla bituminosa convencional, y capa de rodadura de lechada bituminosa muy desgastada con menor macrotextura superficial.

Todos los tramos, donde se ha procedido a su estudio, se encuentran marcados en la (Fig.6), donde se muestran las coordenadas GPS de los tramos estudiados. En la parte derecha del gráfico se indica el número de cada ensayo realizado. Todas las mediciones se han realizado a una velocidad constante de 50 km/h.

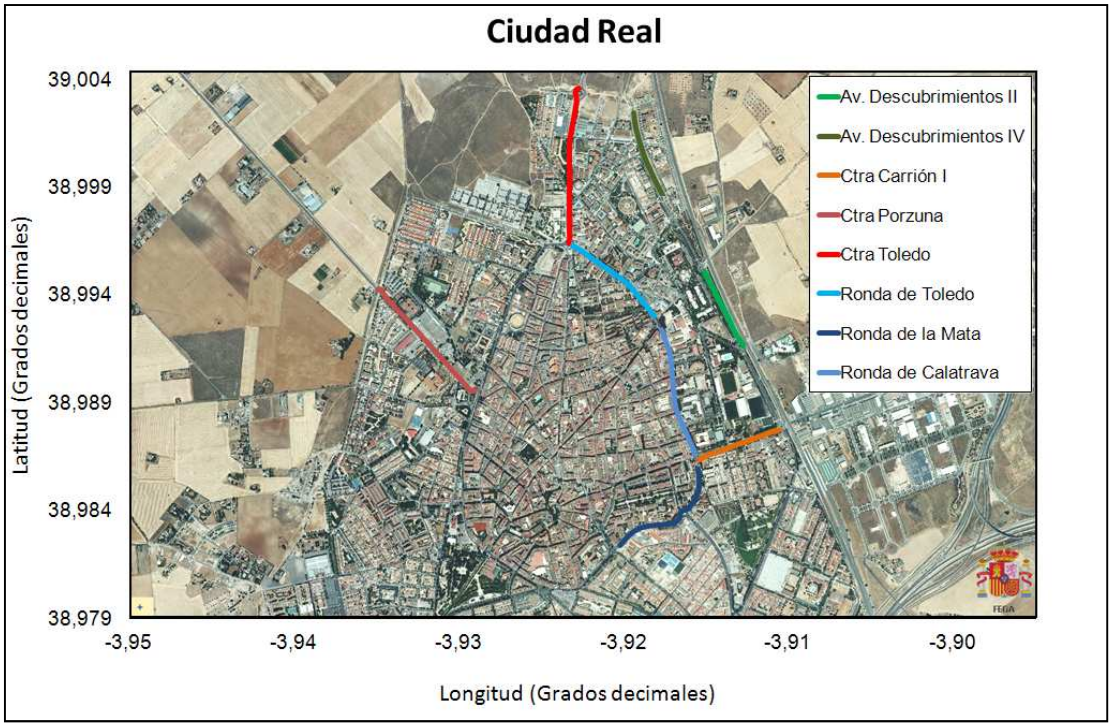



Fig.6.- Tramos urbanos estudiados en Ciudad Real con velocidad de referencia de 50 km/h

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se muestran los resultados en línea más destacados de los distintos tramos urbanos que se resumen en la tabla 1. Los equipos registran los niveles $L_{CPtr}$ de ruido de rodadura, obtenidos mediante el equipo Tiresonic Mk4 - LA$^2$IC, con sus correspondientes coordenadas GPS.

| Tramo | Calle | Tipo Pavimento | Edad (años) | Niveles $L_{CPtr}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 2008 | 2013 | 2015 |
| 1 | Avda Descubrimientos II L | AC - D8 | >3 | 89,30 | 83,90 | 91,33 |
| 2 | Avda Descubrimientos II R | AC - S12 | >5 | 89,30 | 90,60 | 91,33 |
| 3 | Avda Descubrimientos IV | AC -D8 | >5 | 88,42 | 89,80 | 92,9 |
| 4 | Ctra Carrion I | AC - D20 | >5 | 91,20 | 93,30 | 94,3 |
| 5 | Ctra Porzuna | FRES+AC -S12 | <1 | 91,80 | | 87,08 |
| 6 | Ctra Toledo | AC -S12 | >3 | 91,24 | 88,40 | 92,4 |
| 7 | Ronda de Toledo | AC+LB | >5 | 88,40 | 89,30 | 90,73 |
| 8 | Ronda de la mata | AC+LB | >5 | 90,00 | | 91,12 |
| 9 | Ronda de Calatrava | AC+LB | >5 | 88,80 | | 90,82 |

Tabla 1. Tramos evaluados, $L_{CPtr}$ (50 km/h) en distintos años.

Se recuperaron los datos obtenidos en anteriores campañas de medición en concreto en los años 2008 y 2013, en donde en algunos tramos se había procedido a su restauración como se indicó en el apartado zona de estudio.

Las medidas realizadas sobre superficies de rodadura con edad inferior a dos años indican superficies poco ruidosas, cuyo resultado del índice $L_{CPtr}$ es inferior al valor referencia de 90 dB (A) [8]. En los demás casos, como no se han desarrollado planes de actuación o si se han hecho han pasado más de 2 años, los niveles de ruido han subido significativamente, empeorando los que había en años anteriores. En algunos casos se han superado los que se registraron antes de las actuaciones reparadoras que se hicieron, como se puede apreciar en la (Fig.7).

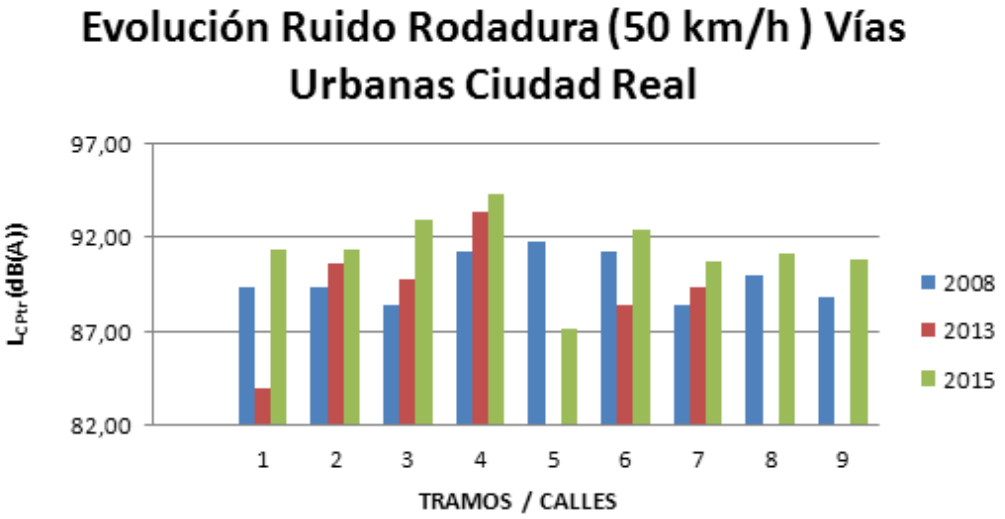



Fig.7. Evolución temporal del ruido de rodadura (50 km/h) en tramos de Ciudad Real.

Un ejemplo claro del deterioro sufrido a lo largo de los años se puede apreciar en la Ronda de Toledo, donde no se ha realizado ninguna actuación de mejora, en los espectros mostrados en la (Fig.8), durante los tres años donde se tienen mediciones se observa como aumenta los niveles de ruido especialmente en el 2015.

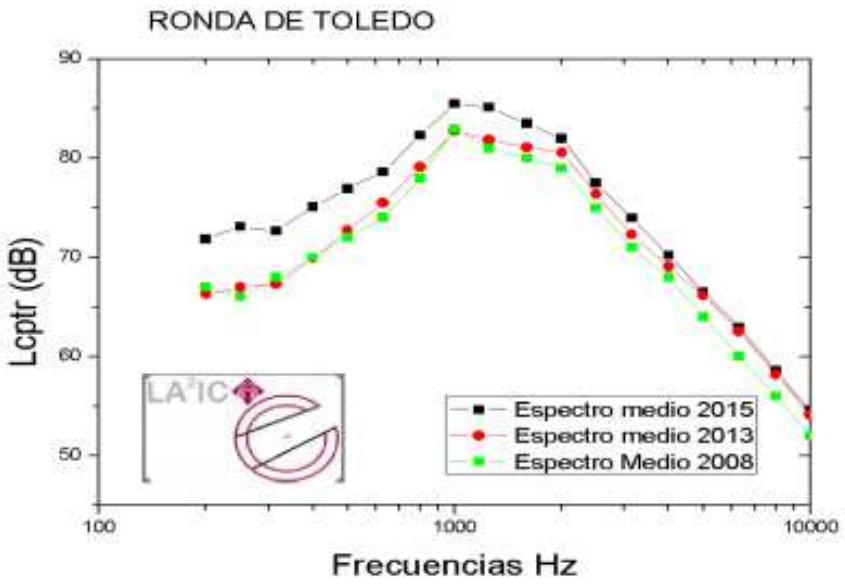



Fig.8. Evolución temporal 2008-2015, de espectro de rodadura en la Ronda de Toledo.

En 2012/13 el Ministerio de Fomento a través de la Dirección General de Carreteras hizo Mapas Estratégicos de Ruido (MER) de las Carreteras de la Red del Estado [9] donde se encontraba la N-401 a su paso por Ciudad Real, concretamente los tramos que denominados en la Tabla 1 carretera de Toledo y ronda de Toledo en donde se apreciaban alrededor de 70 dB de ruido ambiente y las mediciones efectuadas en este trabajo el ruido interacción neumático/pavimento ha aumentado alrededor de 4 dB, con lo cual cabe pensar que también se ha producido un aumento significativo del ruido ambiental. En el tramo de la carretera de Carrión se observa un deterioro muy importante. Esta zona lleva más de diez años sin que se proceda a su recuperación y los niveles de ruido alcanzan valores inadmisibles (Fig.9)

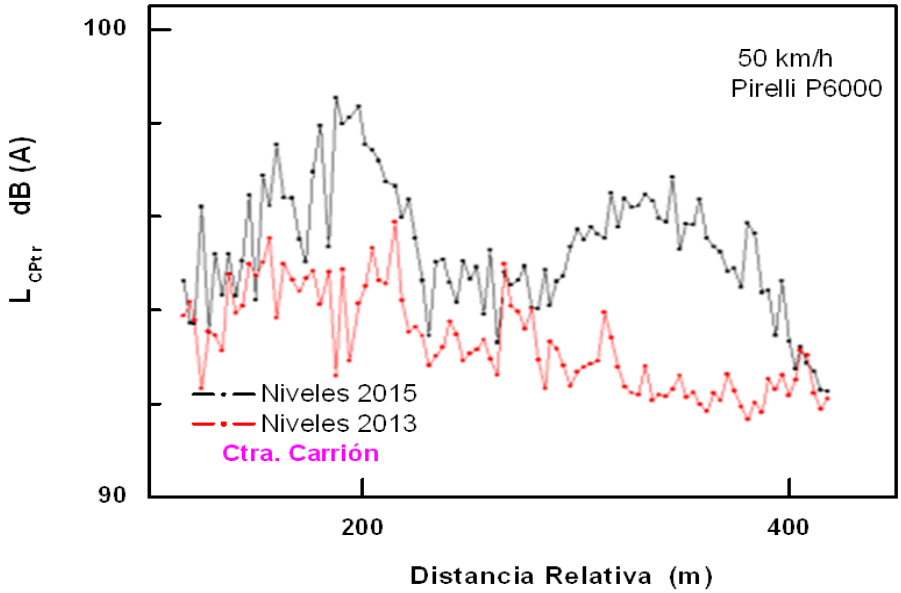



Fig.9. Niveles sonoros en el tramo urbano de la Carretera de Carrión.

## CONCLUSIONES

En este trabajo la medición del ruido de rodadura tiene como objetivo principal la geo-auscultación acústica de pavimentos, aunque también puede ser empleada para la evaluación de la calidad de las superficies de rodadura ya existentes, así como para la determinación de las necesidades de rehabilitación de los pavimentos.

Esta capacidad está determinada por la relación existente entre el deterioro del firme y el aumento del ruido de rodadura emitido. Por otro lado se puede estudiar la evolución temporal de la textura de los pavimentos deseados y determinar cuándo es el momento indicado para realizar intervenciones de conservación o rehabilitación, sobre todo de gran relevancia en el caso de vías urbanas, donde el deterioro del firme tiene gran repercusión negativa en la población afectada.

Además de los MER se podría incluir los estudios de ruido de la interacción neumático/pavimento para categorizar los puntos de conflicto, ampliando elementos como expusieron Serrano et al. [10].

Deberían hacerse nuevos Mapas Estratégicos de Ruido, pues las condiciones de las vías han cambiado significativamente, evolucionando a peor, al menos en las referentes a Ciudad Real y por tanto, el ruido ambiental ha empeorado.

En el estudio acústico de diferentes tramos de Ciudad Real, con características de composición y tiempo de servicio distintos, con los resultados obtenidos, y comparando los tramos de acuerdo al tipo de capa de rodadura, se puede concluir que:

- Todos los tramos han sufrido un aumento de su nivel sonoro con el paso del tiempo, salvo aquellos en los que se ha realizado algún tipo de intervención para su reparación o mantenimiento. En los casos que se realizó algún tipo de intervención, pasados tres años, desde que se produjo la intervención han vuelto a alcanzar los niveles sonoros anteriores, y en algunos casos incluso superiores. En general, se observa que existe una relación entre la edad de la capa de rodadura y ruido de rodadura, aumentando el nivel de ruido con el tiempo y desgaste de las superficies.

- Los tramos construidos con hormigón bituminoso, o mezclas bituminosas convencionales, son más ruidosos que los tramos en los que existe una rodadura de tipo de lechada bituminosa, en este caso, la menor macrotextura, les lleva a mejorar su nivel de emisión de ruido.

- Todos los pavimentos con más de cinco años de antigüedad pasan el nivel sonoro de los 90 dB (A), registrados a 50 km/h como velocidad de referencia. Este podría ser un índice que indicara la necesidad de una intervención sobre esos firmes.

## AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo se ha contado con la financiación de la Consejería de Ciencia y Tecnología de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha a través del proyecto PPII-2014-012-A y del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y FEDER, dentro del marco del proyecto BIA 2012-32177.

## REFERENCIAS

[1] World Health Organization. Guidelines for comunity noise. 1999

[2] Santiago Espósito Paje. Innovación para el Control de Ruido Ambiental 2013. Colección Ciencia y Tecnica 61. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.

[3] Ley 37/2003 de 17 de noviembre, de Ruido.

[4] S.E. Paje, M.Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A. H. Martínez, “Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber” Applied Acoustics. 71, 2010

[5] M. Bueno, J. Luong, U. Viñuela, F.Terán, S.E. Paje, “Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise” Applied Acoustics. 72, 2011

[6] M. Bueno, Caracterización Acústica de Mezclas Asfálticas para Atenuar la Contaminación Sonora, PhD thesis ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (spain), 2010

[7] J. Luong, Evaluación de la Superficie de Mezclas Asfálticas: textura y Absorción Acústica relacionadas con el Ruido de Rodadura, PhD thesis, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real - Universidad de Castilla-La Mancha (Spain), 2012

[8] S.E.Paje. Revista Carreteras, número extraordinario CILA Noviembre 2013. Titulo. Mezclas asfálticas con polvo de caucho NFU: Evaluación acústica de servicio.

[9] Mapas Estratégicos de Ruido de las Carreteras de la Red del Estado Segunda Fase. Dirección General de Carreteras. N-401.

[10] José Mª Serrano Fernández; Ricardo Hernández Molina, José Luis Cueto Ancela, Fernando López Santos, “Comparativa de métodos para la localización de puntos de conflicto. (Hot Spots). Caso de estudio: A-376 Sevilla-Utrera. Comunicación TECNOACUSTICA 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# COMPARATIVA ENTRE LA PERCEPCIÓN CIUDADANA DE LOS CONFLICTOS ACÚSTICOS Y LOS CONFLICTOS DETERMINADOS DEL ANÁLISIS DEL MAPA ESTRATÉGICO DE RUIDO (MER) DE LA CIUDAD DE MÁLAGA

PACS: 43.50.Lj

Medina-Montoya Hellgren[1], Luis; López Santos, Fernando[2]; Carretero de la Rocha, David[2]; Giménez Anaya, Isabel[2]
[1] Ayuntamiento de Málaga. Director General del Área de Sostenibilidad Medioambiental y Director-Gerente Patronato Botánico "Ciudad de Málaga".
Dirección: Pº Antonio Machado, 12 – 29002, Población: Málaga, País: España
Tel: 951927153, E-Mail: lmedinam@malaga.eu
[2] SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L.
Dirección: Avda. San Francisco Javier, nº 9, Edif. Sevilla 2, Planta. 5ª, Mód. 27-28; CP 41018, Población: Sevilla, País: España
Tel: 954510031, Fax: 954250684, E-Mail: flopez@sincosur.es, dcarretero@sincosur.es, isabel@sincosur.es

## ABSTRACT

Studying the results of a Strategic Noise Map (SNM) of an urban agglomeration may define a mismatch scenario, since current regulations only considers sources of noise generated by road, railway and air traffic and industrial environments including ports. Nevertheless, if the urban agglomeration holds a communication channel through which inhabitants can forward their complaints related to noise pollution to the local government, important differences may appear between the results defined by the SNM analysis and the inhabitant subjective perception. This paper develops the case of Málaga, defining the methodology used to determine the hot spots in the SNM, showing the scenario generated by the treatment of complaints and making a comparative analysis of the data obtained.

## RESUMEN

El estudio del resultado de un Mapa estratégico de Ruidos de una aglomeración puede definir un escenario de conflictividad que debido a la normativa vigente solo tenga en cuenta los focos de ruidos generados por el tráfico rodado, ferroviario, aeroportuario y los lugares de actividad industrial incluidos los puertos, sin embargo en ciudades en donde exista un canal de información por el cual los habitantes puedan trasladar al Ayuntamiento sus quejas relacionadas con la contaminación acústica se pueden presentar unas diferencias importantes entre el escenario definido del análisis del MER frente a la percepción subjetiva del ciudadano. La comunicación desarrolla el caso de Málaga definiendo en primer lugar la metodología para determinar los escenarios de conflicto del MER y el escenario generado por tratamiento de las quejas – denuncias, realizando un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Área de Sostenibilidad Medioambiental del Excmo. Ayuntamiento de Málaga, con el fin de actualizar las medidas a desarrollar en el marco de los Planes de Acción contra el Ruido en base a los resultados obtenidos tras el II Mapa Estratégico de Málaga, puso en marcha la

contratación del "**SERVICIO DE CONSULTORÍA Y ASISTENCIA TÉCNICA RELATIVA A REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANES DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO DE MÁLAGA**", resultando SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L. adjudicatario del contrato en Noviembre de 2014.

Dentro de los trabajos previstos en la realización de este nuevo Plan de Acción contra el Ruido, se encontraba el estudio detallado de las zonas de conflicto expuestas por el Mapa Estratégico de Ruido y el tratamiento estadístico y espacial de las diferentes quejas y denuncias canalizadas a través del Área de Sostenibilidad Medioambiental durante los años 2013 y 2014, y con denominador común el ruido ambiental

Los Mapas Estratégicos de Ruido (MER) de una ciudad se conforman como una herramienta útil para la determinación de la situación acústica de un municipio, dando a conocer las fuentes generadoras de contaminación acústica y su incidencia sobre la población. Estos mapas reflejan niveles promedio a lo largo de un año y se constituyen como un estudio a gran escala.

Atendiendo a las directrices de las distintas normativas en materia de contaminación acústica que son de aplicación para la elaboración de los MER, las fuentes de ruido a considerar en estos mapas son típicamente las infraestructuras viarias, ferroviarias, aeroportuarias e industriales (incluyendo puertos). La emisión acústica de todas estas fuentes sonoras se puede caracterizar mediante modelos matemáticos que toman como parámetros de entrada datos como el número de vehículos, la velocidad, los periodos de funcionamiento, etc. Estos modelos matemáticos se encuentran incorporados en el software de predicción acústica que se utilizan para el cálculo de los MER.

Existe un gran número de fuentes ruidosas existentes en las ciudades que, por su naturaleza, no se pueden incluir en los mapas estratégicos de ruido. Se tratan de fuentes, por lo general, de funcionamiento puntual, que no se pueden caracterizar mediante modelos matemáticos. Ruidos procedentes de actividades vecinales, comportamientos incívicos, actividades de ocio, obras urbanísticas, etc. son un ejemplo de este tipo de fuentes no modelables.

Si bien el MER es una buena herramienta para la definición de actuaciones para la lucha contra la contaminación acústica de una ciudad, no contempla todas las fuentes sonoras que existen en ella. Cabe la posibilidad, así mismo, que los problemas acústicos que reflejen los MER no sean coincidentes con los problemas que la ciudadanía percibe.

Aparte del estudio analítico y objetivo del MER, es imprescindible estudiar la molestia percibida por la ciudadanía, evaluando el aspecto subjetivo del problema de la contaminación acústica. De esta forma, las medidas preventivas, correctoras y de mejora continua de un Plan de Acción pueden responder tanto a las necesidades objetivas y cuantitativas desde el punto de vista del MER como a las necesidades subjetivas y cualitativas de la población.

La percepción ciudadana sobre la contaminación acústica se ha determinado a partir del estudio de las quejas y denuncias que ha registrado el Área de Sostenibilidad Medioambiental del Excmo. Ayuntamiento de Málaga. De esta forma se han conocido los problemas acústicos que más preocupan a la población y su distribución espacial a lo largo del municipio.

En esta comunicación se expondrá, en primer lugar, la metodología empleada para la detección de las zonas de conflicto, en base a los resultados del MER, y para el tratamiento y análisis de todas las quejas y denuncias registradas por el Ayuntamiento de Málaga. Posteriormente, se expondrán y analizarán los resultados de los puntos de conflicto detectados y finalmente se plantearán conclusiones acerca de cómo percibe la población el problema de la contaminación acústica y de si realmente existe una equivalencia entre los conflictos detectados por el MER y los detectados tras el análisis de las quejas y denuncias por ruidos.

## 2.- METODOLOGÍA

### 2.1.- Mapa de Zonas de Conflicto

En el punto 6 del anexo IV "*Requisitos mínimos sobre el cartografiado estratégico de ruido*" del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, se indica que para la elaboración de los planes de acción contra el ruido se deben elaborar mapas que indiquen las superaciones de un valor límite. Esto queda satisfecho por los **mapas de Zonas de Conflicto**, obtenidos mediante la comparativa de los niveles sonoros resultantes del MER para los indicadores Ld, Le y Ln con los Objetivos de Calidad Acústica (expuestos en el anexo II del Real Decreto 1367/2007) asignados a cada zona acústica del territorio por la zonificación acústica del municipio malagueño. En este mapa se recogen aquellas zonas acústicas en las que se superan los Objetivos de Calidad Acústica y el número de decibelios de superación.

Este mapa de zonas de conflicto nos ofrece una primera visión sobre "dónde se encuentran los problemas". Sin embargo, no tiene en cuenta la exposición al ruido en términos de números de personas y nivel acústico de afección, siendo necesario profundizar más en dicho conocimiento, para el establecimiento adecuado de un plan de acción.

### 2.2.- Puntos de Conflicto

A partir de la visión global de las zonas de conflicto localizadas en el municipio, se han determinado puntos de conflicto sobre los que se han planteado medidas concretas de actuación, atendiendo a criterios de prioridad y buscando la optimización de las futuras inversiones. Para ello, se han estudiado las áreas residenciales expuestas y las edificaciones sensibles expuestas (centrando la atención sobre aquellas de carácter sanitario y docente), cuantificando las variables de población expuesta (número de habitantes, alumnos o camas) y el nivel acústico soportado por la población o el edificio.

Considerando estas variables, se han planteado diferentes escenarios de actuación generados por la variación de la población expuesta y la variación de los niveles acústicos en los diferentes periodos del día. De estos escenarios, se han escogido candidatos a puntos de conflicto de mayor prioridad de actuación para una posterior validación de los mismos, con el fin de comprobar si realmente existe afección como plasma el MER. Para la validación de los candidatos a puntos de conflicto se ha realizado un estudio detallado de cada punto, que incluye trabajo de oficina y trabajo de campo (visitando cada candidato a punto de conflicto), en el que se realiza un reportaje fotográfico y se recoge información acerca de la localización del punto de conflicto, de la caracterización de las fuentes de ruido, del entorno, de las edificaciones expuestas, y se realiza un diagnóstico y una propuesta de actuaciones, con valoración económica incluida.

Tras el proceso de validación, se ha desestimado todos los candidatos a puntos de conflicto donde se haya comprobado que no existiera afección acústica (ya sea por errores de asignación del uso de las edificaciones, por existencia de elementos no contemplados en el modelo, por no existir los elementos marcados como expuestos al ruido, por tráfico viario muy reducido con respecto al establecido en el MER, etc.)

Finalmente, se ha realizado un análisis multicriterio sobre los puntos de conflicto consolidados donde se ha estudiado la prioridad de urgencia de la actuación en base a variables como eficiencia, eficacia, coste, nivel sonoro de inmisión, indicador de prioridad SVRA, etc.

### 2.3.- Zonas de conflicto en base a las quejas y denuncias de la ciudadanía

La elaboración del Plan de Acción contra el Ruido de Málaga incluía la elaboración de un estudio de quejas y denuncias por ruido canalizadas a través de diversos medios del municipio malagueño, para el periodo 2013 – 2014. Estas quejas y denuncias resultan uno de los pilares

fundamentales de toma de información para la identificación de problemas de ruido fuera de las zonas estudiadas en el MER, como son el ruido asociado a las actividades de ocio, comportamientos incívicos, molestias vecinales, labores de limpieza, recogida de basuras,… permitiendo la identificación y localización exacta de los problemas.

Para este trabajo, el Área de Sostenibilidad Medioambiental del Ayuntamiento de Málaga ha entregado la información correspondiente a las denuncias y quejas en materia de contaminación acústica realizadas entre el 1 de enero de 2013 y el 31 de diciembre de 2014, obtenidas a través de las siguientes fuentes canalizadoras:

- Quejas recibidas a través de la línea telefónica 092 de la Policía Local
- Quejas recibidas a través de la línea telefónica 900 del Ayuntamiento de Málaga
- Denuncias realizadas ante la Policía Local
- Denuncias realizadas ante el Área de Sostenibilidad Medioambiental

En total, se han contabilizado 20.375 registros de quejas y denuncias (10.877 en el año 2013 y 9.498 en el año 2014) entre el 1 de enero de 2013 y el 31 de diciembre de 2014. Cada uno de estos registros cuenta con información del motivo de la incidencia y de la fecha y el lugar donde se produce.

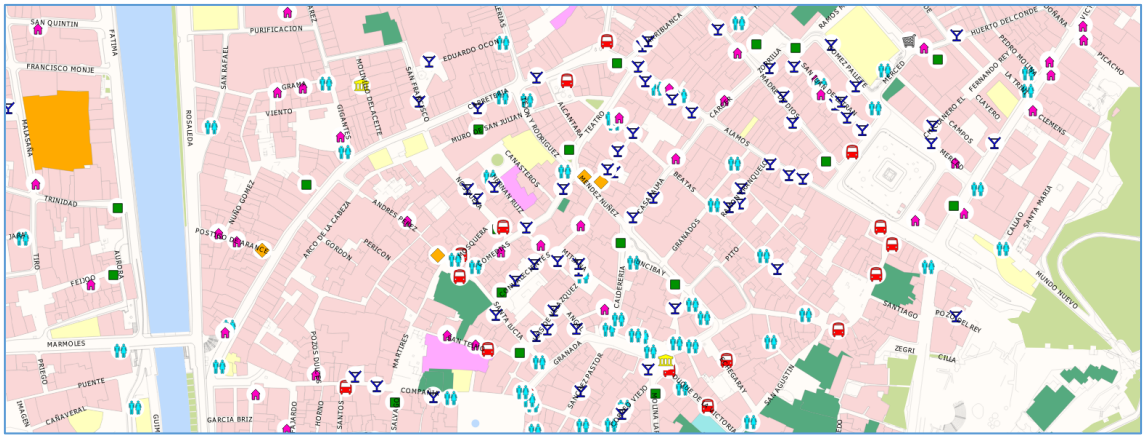
Para el correcto tratamiento de las quejas y denuncias ha sido necesario establecer un criterio que permitiese comparar entre sí las quejas/denuncias obtenidas de los distintos medios canalizadores. Esto implica categorizar cada queja y denuncia conforme a una tipología concreta, en base a los atributos relacionados con los motivos de la incidencia.

Para esta labor, con el fin de mantener uniformidad con respecto al informe anterior de estudio de quejas y denuncias en el periodo 2011 – 2012, se ha decidido utilizar las mismas tipologías de quejas y denuncias que las que se plantearon en dicho estudio, las cuales se listan a continuación:

| Tipo | | Categoría | Descripción |
|---|---|---|---|
| 1 | | Actividad portuaria | Ruidos relacionados con la infraestructura portuaria y actividades complementarias. |
| 2 | | Tráfico ferroviario | Ruidos relacionados con la infraestructura ferroviaria y actividades complementarias. |
| 3 | | Tráfico aéreo | Ruidos relacionados con la infraestructura aeroportuarias y actividades complementarias. |
| 4 | | Servicios municipales | Servicios de limpieza, conservación, seguridad, sanidad, etc. |
| 5 | | Tráfico rodado | Ruidos procedentes de vehículos y de la actividad circulatoria. |
| 6 | | Actividades de hostelería | Ruidos propios de bares, terrazas, pubs, discotecas, etc. |
| 7 | | Actividades de ocio | Ruidos procedentes de eventos y fiestas organizadas. |
| 8 | | Actividades culturales | Ensayos de bandas de Semana Santa, eventos en centros culturales, educativos, religiosos, etc. |
| 9 | | Actividades comerciales | Ruidos procedentes de tiendas y actividad comercial general. |
| 10 | | Actividades deportivas | Emisiones provenientes de recintos deportivos y actividades deportivas en entornos abiertos. |
| 11 | | Actividades industriales | Emisiones de actividades productivas ligadas al sector. |
| 12 | | Actividades urbanísticas y obras | Trabajos de construcción y/o remodelación en la vía pública o de carácter privado. |

| Tipo | | Categoría | Descripción |
|---|---|---|---|
| 13 | | Focos de ruido exteriores | Focos estacionarios en exterior como motores, equipos de clima, etc. |
| 14 | | Actividades vecinales | Ruidos procedentes de viviendas colindantes o próximas, siempre con origen en un recinto habitable. |
| 15 | | Actividades y comportamientos incívicos | Concentraciones y comportamientos ruidosos en la vía pública sin un permiso oficial ni estructura organizativa. Vehículos discoteca. |

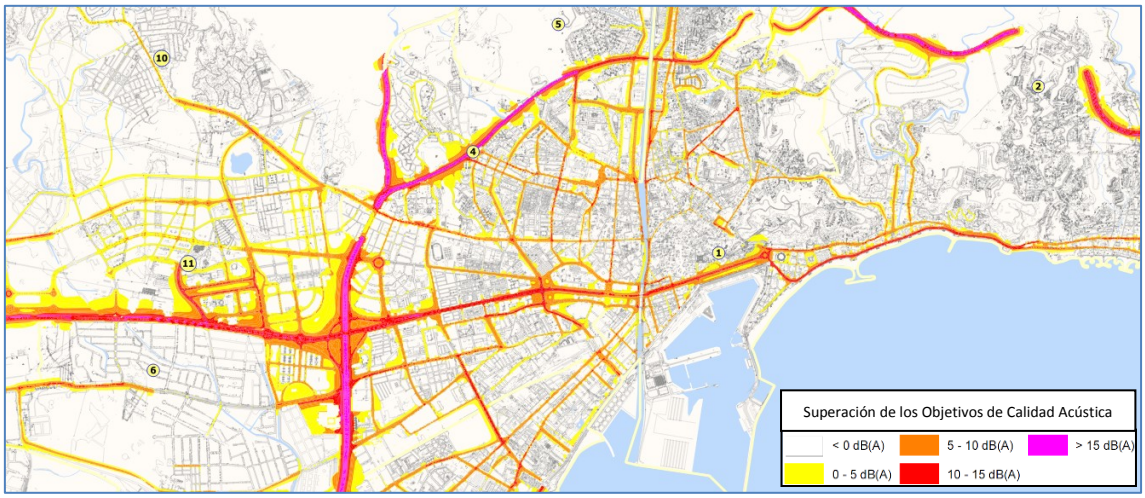
Tras el tratamiento informático de todos los registros, y la incorporación de la categoría correspondiente a cada uno, se ha posicionado cada incidencia utilizando el callejero del municipio y la dirección completa asociada a cada queja y denuncia. Esto nos ha permitido incluir y representar espacialmente todos los registros dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), donde se pueden obtener estadísticas acerca de cómo se reparten las incidencias por barrios y distritos y de cuáles son los motivos de mayor queja, desarrollar tratamientos espaciales avanzados y visualizar aquellas zonas en las que se concentran incidencias.




## 3.- RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1. – Zonas de conflicto

Tras la elaboración del mapa de Zonas de Conflicto, se aprecia que, atendiendo a los resultados del MER, los problemas acústicos están asociados al ruido generado por el tráfico viario que se constituye como el emisor acústico predominante, siendo los ejes viarios que discurren por el interior de la aglomeración los que generan mayor impacto acústico.




Tomando la información de los receptores en fachada de los edificios, analizando los resultados de población expuesta, para las diferentes fuentes de ruido, también se observa que el tráfico viario se constituye como el emisor acústico predominante.

| Población expuesta – Lden (datos en centenas) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **dBA** | **R. Total** | **T. Viario** | **Industrial** | **T. Ferroviario** | **T. Aéreo** |
| **<55** | 1639 | 1721 | 5708 | 5752 | 5698 |
| **55 – 60** | 1232 | 1207 | 25 | 1 | 37 |
| **60 – 65** | 1166 | 1131 | 10 | 0 | 15 |
| **65 – 70** | 1204 | 1191 | 10 | 0 | 2 |
| **70 – 75** | 476 | 470 | 0 | 0 | 1 |
| **> 75** | 36 | 33 | 0 | 0 | 0 |

Atendiendo a los Objetivos de Calidad Acústica definidos para los sectores del territorio con predominio de uso de suelo residencial, establecidos en 65 dB(A) para los índices Ld y Le, y en 55 dB(A) para el índice Ln, encontramos que:

- Ld: 75 % de la población dentro de los objetivos de calidad.
- Le: 80 % de la población dentro de los objetivos de calidad.
- Ln: 72 % de la población dentro de los objetivos de calidad.

### 3.2.- Puntos de conflicto consolidados

Tras la definición de un escenario de puntos de conflicto y la verificación de los mismos, se han obtenido 23 puntos consolidados, sobre los que se realizarán propuestas de actuación de lucha contra el ruido. Estos puntos se encuentran en torno a las zonas de conflicto presentadas en el apartado anterior.

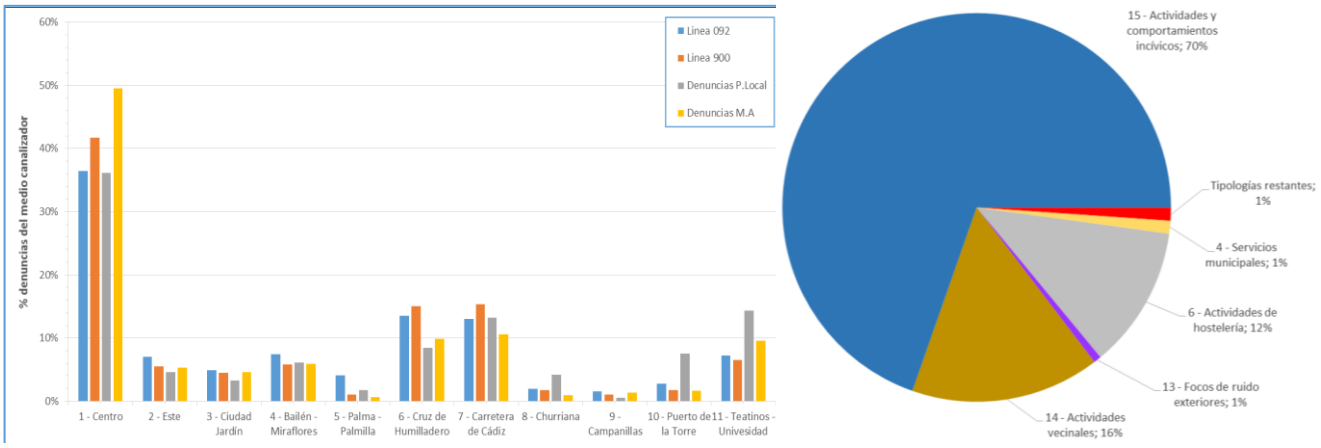


### 3.3.- Quejas y denuncias por ruido

A continuación se presenta una relación del número total de quejas/denuncias recogidas por cada medio canalizador para el periodo 2013 – 2014. Como se puede ver, el medio al que más recurrieron los ciudadanos para mostrar su malestar frente a los problemas de contaminación acústica fue el número 092 de la Policía Local:

| Medio canalizador | Número de registros | Porcentaje |
|---|---|---|
| **Quejas línea policía 092** | 18.159 | 89% |
| **Quejas línea 900** | 398 | 2% |
| **Denuncias Medio Ambiente** | 303 | 1% |
| **Denuncias policía local** | 1.515 | 7% |
| **TOTAL** | **20.375** | **100%** |

Analizando la información según los distritos municipales, se observa que existe un reparto similar del porcentaje de incidencias registradas por distrito. Por otro lado, atendiendo al cómputo global de las quejas/denuncias registradas, se observa que las actividades y comportamientos incívicos registran el mayor número de incidencias (14.188 registros, un 70% del total), seguido por las actividades vecinales (3.204 registros, un 16% del total) y por las actividades de hostelería (2.413 registros, un 12% del total).




Es destacable que, el resto de tipologías planteadas únicamente represente menos de un 3% del total de las incidencias registradas. De este pequeño grupo, **las quejas y denuncias relativas a las fuentes sonoras contempladas en el Mapa Estratégico de Ruido representan una porción mínima de 0.04 % del total de incidencias registradas:**

- 1 – Actividad portuaria: ningún registro
- 2 – Tráfico ferroviario: 3 registros
- 3 – Tráfico aéreo: ningún registro
- 5 – Tráfico rodado: 4 registros
- 11 – Actividades industriales: 1 registro

Estos datos ponen en evidencia que las fuentes sonoras típicas y más ruidosas de un municipio no se perciben por parte de la ciudadanía como un problema de contaminación acústica grave, pese que así lo demuestre el MER. El ruido generado por este tipo de fuentes sonoras es de carácter estable en el tiempo, por lo general, y predecible en función de ciertas variables características. En contrapunto, la mayor parte de las quejas y denuncias se registran en aquellas actividades que generan un ruido de carácter puntual, no estable en el tiempo y de nivel sonoro variable.

## 4.- CONCLUSIONES

En primer lugar, se observa que la **línea telefónica 092 de la policía local fue el medio más utilizado por los malagueños para denunciar molestias provocadas por ruidos**, en el periodo comprendido entre 2013 y 2014. En este medio canalizador se concentra el 89% del total de 20.375 quejas y denuncias registradas en el municipio.

En segundo lugar, considerando el cómputo global de registros de quejas y denuncias, se observa que las tipologías que concentran el mayor número de incidencias por ruido son las actividades y comportamientos incívicos (un 70% del total), las actividades vecinales (un 16% del total) y las actividades de hostelería (un 12 % del total)

El resto de las tipologías consideradas únicamente representa menos de un 3% del total de incidencias registradas. **De este grupo, sólo un 0.04 % se corresponde con las fuentes de ruido consideradas en el Mapa Estratégico de Ruido (tráfico viario, ferroviario, aeroportuario, actividades industriales y portuarias)**

Es muy destacable el hecho de que las fuentes sonoras del MER, que dibujan el paisaje sonoro de la ciudad al ser las fuentes sonoras de mayor impacto acústico, no representen un problema de contaminación acústica para la población, a pesar de que los resultados del MER y del Plan de Acción, demuestren que existe afección acústica en la ciudad.

Hay que tener en cuenta que el ruido generado por este tipo de fuentes sonoras es de carácter estable en el tiempo, por lo general, y predecible en función de ciertas variables características. Gracias a este hecho, este tipo de ruidos se pueda estimar mediante modelos matemáticos para el cálculo del MER. **No ocurre lo mismo con los tipos de ruidos que más preocupan a la población, de carácter puntual, no estables en el tiempo y de nivel sonoro variable**, generados fundamentalmente por actividad humana (voz, gritos, golpes, etc.)

De estos resultados se puede sacar una lectura importante. **La población ha asimilado el ruido de las principales infraestructuras de la ciudad**, no resultando, a priori, tan molesto como ocurre con el ruido producto de la actividad humana, aunque el ruido de las infraestructuras sea incluso mayor. Es destacable como **la naturaleza del ruido, que sea estable en el tiempo o de carácter puntual, influye mucho en cómo la gente percibe la molestia del ruido.**

Analizando espacialmente los resultados totales, se ha observa que el **centro histórico de Málaga** concentra el mayor número de incidencias cada 100 habitantes, proponiéndose esta zona como prioritaria para el establecimiento de medidas correctoras para reducir las quejas y denuncias por contaminación acústica. Sin embargo, **esta zona no se ha catalogado como zona de conflicto según los resultados del MER**, debido al escaso tráfico viario que por sus calles circulan.

En tercer y último lugar, tras la incorporación al estudio de quejas y denuncias de los resultados del estudio homónimo para el periodo 2011 – 2012, se ha descubierto que existe una tendencia de disminución del número de incidencias registradas. Desde el año 2011 hasta ahora, **el cómputo global de registros de quejas y denuncias por ruido se ha reducido en aproximadamente un 22 %.**

## 5.- BIBLIOGRAFÍA

[1] *Revisión y actualización de los Planes de Acción contra el Ruido en Málaga. Ayuntamiento de Málaga*. SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L.

[2] *Revisión y actualización del Mapa Estratégico de Ruido de la Aglomeración de Málaga*. Ayuntamiento de Málaga. UTE Tecnitax Eygema.

[3] *Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental*. «DOUE» núm. 189, de 18 de julio de 2002, páginas 12 a 25.

[4] *Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido*. «BOE» núm. 276, de 18 de noviembre de 2003, pp. 40494 - 40505.

[5] *Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental*. «BOE» núm. 301, de 17 de diciembre de 2005, pp. 41356 - 41363.

[6] *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.* «BOE» núm. 254, de 23 de octubre de 2007, pp. 42952 - 42973.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ASPECTOS ACÚSTICOS EN EL DISEÑO DE ESPACIOS EXTERIORES ESPECÍFICOS PARA PERSONAS CON AUTISMO

PACS: 43.50.Qp

Martín Fanjul, Valentín; Daumal i Domènech, Francesc
Escola Tècnica Superior d´Arquitectura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya
Campus Diagonal Sud, Edifici A. Av. Diagonal, 649, 08028, Barcelona.
Tel/Fax: (+34)934016387 / (+34)934016426
Email: vmf@coac.net / francesc.daumal@upc.edu

## ABSTRACT

The difficulty in the process of sensory perception in people belonging to the autism spectrum, increases in situations related to outdoor environments, due to the existence of a greater number of variables to consider.

The need for outdoor activities, often with a therapeutic mission, requires the adequacy of these environments and therefore more complexity in its design.

Keywords: autism, ASD, acoustic, architecture, outdoors environments, therapeutic activities, sensory environments, soundscape.

## RESUMEN

La dificultad en los procesos de percepción sensorial en las personas pertenecientes al espectro autista, aumenta en situaciones relacionadas con entornos exteriores, debido a la existencia de un mayor número de variables a considerar.

La necesidad de realizar actividades al aire libre, en muchas ocasiones con una intención terapéutica, requiere la adecuación de estos entornos y por lo tanto una mayor complejidad en su diseño.

Palabras clave: autismo, TEA, acústica, arquitectura, entornos exteriores, actividades terapéuticas, entornos sensoriales, paisaje sonoro.

## INTRODUCCIÓN

En el concepto de paisaje sonoro establecido por R.M. Schafer se distinguen tres niveles, tonalidad, señales sonoras y marcas sonoras, estas escalas no son interpretadas en la mayoría de las personas pertenecientes al espectro autista de igual manera que las personas neurotípicas.

Remington, Swettenham, Campbell y Coleman (2009) comprobaron que las personas pertenecientes al espectro autista tienen un déficit general en la atención selectiva, lo que les dificulta poder asignar eficazmente el interés en una actividad central, independientemente de la carga de estímulos que estén recibiendo, lo que supone una pérdida de exactitud y velocidad en los sentidos.

Esta forma de recibir e interpretar los estímulos exteriores, incluidos los acústicos, implica que los espacios donde estas personas realizan su actividad vital requiere de características especiales para facilitar su integración, mas aun cuando nos referimos a espacios exteriores, donde es más difícil el control acústico al existir mas variables y situaciones no predecibles sensorialmente.

Martín y Daumal (2015) en sus estudios sobre las características acústicas en los espacios destinados para las personas con TEA, indican que sus reacciones pueden ir desde la hipersensibilidad hasta la hiposensibilidad en los sonidos que habitualmente nos rodean en nuestros entornos.

También indican, que los sentidos más afectados generalmente en las personas pertenecientes al espectro autista son el oído y el tacto, de ahí la importancia de estudiar las características acústicas adecuadas en los recintos, tanto interiores como exteriores.

Un ejemplo serían los sonidos de fondo generados por la naturaleza, los cuales para una persona neurotípica están en segundo plano, raras veces les hacemos caso, ya que nuestra capacidad para discriminar y jerarquizar los sonidos que recibimos nos permite su adecuada estructuración, mientras que las personas con TEA mayoritariamente no interpretan los estímulos acústicos de igual manera, sufriendo una suma de sonidos.

Recientes investigaciones sobre relación entre el contacto con la naturaleza y la realización de actividades al aire libre confirman positivamente las mejoras en los niños y adultos con trastornos neuronales.

Un espacio exterior, ya sea para realizar actividades pedagógicas, o simplemente para fomentar el juego, propicia la independencia y libertad de las personas autistas, su existencia en los centros específicos, así como en otros vinculados a su vida diaria, requiere de un estudio acústico adecuado para su correcto funcionamiento.

Por todos estos motivos es importante analizar las características acústicas cuando realizan actividades en el exterior las personas pertenecientes al espectro autista, debido a las implicaciones que tiene este sentido para ellos.

**LA ACTIVIDAD FÍSICA EN EL AUTISMO**

Debido a la dificultad en el comportamiento de las personas con TEA para adaptarse a nuevas situaciones, fuera de las rutinas habituales, suele ser compleja la introducción de nuevas actividades.

Tanto en los centros específicos como en el ambiente familiar, cada vez más se están introduciendo actividades físicas, especialmente en el exterior por sus propiedades terapéuticas.

A continuación serán expuestos algunos de los estudios existentes en la bibliografía respecto a la idoneidad y a las propiedades positivas de la realización de este tipo de acciones en las personas pertenecientes al espectro autista.

Sandt y Frey (2005) analizaron las actividades físicas entre dos grupos, uno de ellos compuesto por niños pertenecientes al espectro autista, comprobaron que durante el tiempo dedicado al ejercicio físico en sus centros educativos, los neurotípicos estaban activos el 50 % del tiempo, mientras que los niños con TEA estaban el 41%, lo que no significa grandes diferencias dadas las características de ambos grupos.

Además se comprobó que el tiempo dedicado a actividades físicas en el hogar, era prácticamente el mismo en ambos grupos, por lo que su implicación fue mayor de la inicialmente prevista.

Taylor y Kuo (2008) verificaron en sus investigaciones que una mayor relación con el exterior y en concreto con la naturaleza, suponía que las personas con TEA mostraran los síntomas propios del autismo de manera más leve, mejorando sus capacidades de percepción y de comprensión.

Kampen (2011) realiza un estudio de la bibliografía existente y sugiere que los niños pertenecientes al síndrome autista mejoraron más sus condiciones cognitivas después de un paseo por un entorno natural que en un entorno urbano.

Por lo tanto, recomienda actividades al aire libre, preferentemente en un medio natural y realizadas de manera estructurada, para potenciar su utilidad y que no sean abandonas finalmente por las personas con TEA.

Pleban, Barney y Burke (2014) investigaron las propiedades positivas de la actividad física en las personas pertenecientes al trastorno del espectro autista indicando sus propiedades y la necesidad de involucrar a sus padres o parientes más cercanos, considerando ocupaciones como las artes marciales, actividades acuáticas y el yoga.

También constatan que no existe la posibilidad de aplicar la actividad física de manera generalizada, teniendo que ser estudiados los casos de manera individualizada, facilitando la integración de la persona.

## LA ACÚSTICA EXTERIOR EN LA ARQUITECTURA

La literatura en lo referente a los aspectos acústicos de los espacios exteriores para personas pertenecientes al espectro autista es muy limitada, se mencionarán algunas reseñas bibliográficas basadas en las experiencias prácticas de algunos profesionales vinculados a la arquitectura, estando muy centradas en la hipersensibilidad acústica.

Herbert (2003) plantea la solución ante ruidos intrusivos que no pueden ser controlados, como el procedente del tráfico o de otro tipo de actividades próximas, enmascarándolas mediante el uso del agua. Menciona el empleo del sonido del agua como factor relajante combinado con elementos vegetales, estos últimos empleándolos también como barreras acústicas para reducir los estímulos sensoriales.

Whitehurst (2006) recomienda cubrir parcialmente los espacios exteriores para mayor protección de sus usuarios, tanto del clima como del ruido.

Mostafa (2008) considera conveniente la creación de una graduación de salas modificadas acústicamente, que finalmente permitan el acceso al exterior de los recintos, para de esta manera evitar un efecto “invernadero sonoro”, con condiciones acústicas protegidas, ya que posteriormente se dificultaría el acceso a espacios convencionales.

Sachs y Vincenta (2010) mencionan la hipersensibilidad e hiposensibilidad sensorial, incluida la auditiva, recomendando el acceso a los espacios exteriores de manera secuencial y no directa, facilitando la adaptación.

Johnston (2012) es partidario de no crear espacios específicos, sobre todo en el ámbito familiar, es decir, en la escala de de la vivienda residencial, prefiere que se diseñen espacios controlados y seguros, que permitan la interactividad y la inclusión familiar, además de generar barreras físicas de protección acústica.

También recomienda una exposición gradual a los espacios exteriores, produciendo una transición adecuada, ya que es donde es más difícil el control sensorial, incluido el acústico, siendo suave, para que la persona acceda al recinto cuando se encuentre preparada.

Blakesley, Rickinson y Dillon (2013) hacen referencia a aspectos explicados por Herbert, además de considerar los espacios al aire libre como zonas donde el autista puede volcar su frustración debido a una sobrecarga de los sentidos, señalando la utilización por parte de los arquitectos de la vegetación, del agua y del aire como instrumentos para generar esos espacios exteriores, facilitando la relajación sensorial, incluida la del oído, reduciendo la saturación.

Lipscomb y Stewart (2014) advierten del riesgo de los edificios próximos a los espacios libres, como jardines, ya que se generan rebotes con las ondas acústicas, que pueden ser perjudiciales tanto para la relajación como para la concentración cuando se realizan ciertas tareas.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Temple Grandin, una persona con un trastorno del espectro autista, nos explica cómo funciona su sistema auditivo: “Mi oído es como tener un audífono con el control de volumen al máximo. Es como un micrófono abierto que recoge todo. Tengo dos opciones, tener encendido el micrófono y estar inundada de sonidos o apagar”.

Esta frase ejemplifica como reciben e interpretan los sonidos, muchas de las personas con TEA, aunque como ya se ha indicado, pueden ser hipersensibles o hiposensibles respecto de los estímulos acústicos.

En el último caso, el de la hiposensibilidad hay que tomar precauciones por su seguridad, un ejemplo práctico sería el ruido del tráfico al querer cruzar una calle, u otras amenazas que advertimos a través del oído las personas neurotípicas, una persona con TEA no se percataría.

Además en estos casos, se debe buscar la estimulación sensorial, como procedimiento terapéutico, para favorecer la incorporación de los sonidos en la vida cotidiana de estas personas, desarrollando este sentido.

En el caso de la hipersensibilidad hay que crear las condiciones acústicas adecuadas para facilitar su integración en los espacios exteriores. Lógicamente en zonas o espacios no acotados, es muy difícil conseguir estas características acústicas propicias.

Distinta casuística es cuando nos referimos a ambientes exteriores que son de uso específico para personas con trastornos del espectro autista, existiendo ciertas medidas que pueden ser aplicadas, algunas de las cuales han sido ya indicadas al describir la bibliografía existente.

Muchos de los autores coinciden en realizar una transición paulatina de espacios acústicamente controlados, para acceder finalmente al exterior y facilitar la adaptación.

Todos los sonidos exteriores no pueden ser eliminados o controlados, pero especialmente en el caso de espacios cercanos a focos sonoros, como pueda ser el tráfico, la utilización de barreras acústicas más la adición del sonido del agua, para tapar o disfrazar estos ruidos, en muchos casos inevitables, puede ser una buena vía para adecuar estos ámbitos.

Junto a estos aspectos habría que desarrollar estudios respecto al tipo de vegetación existente, los materiales a emplear, ya sean pavimentos o el de las propias fachadas exteriores próximas, para evitar reflexiones no deseadas, incluso el tipo de mobiliario o elementos de juego que puedan estar presentes en estos recintos.

El realizar un adecuado diseño acústico de los espacios exteriores, no solo como un elemento de recreo, que también es importante, pero principalmente como un elemento terapéutico incluido dentro de las rutinas habituales, tan necesarias en las personas con TEA que facilitan la estructuración de sus vidas, evitando que suponga una situación compleja para ellos, sus terapeutas y las personas próximas.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Blakesley, D., Rickinson, M. & Dillon, J. (2013). Engaging children on the autistic spectrum with the natural environment: Teacher insight study and evidence review. Natural England Commissioned Reports, NECR116.

- Daumal i Domènech, F. (1998). Arquitectura, acústica. 1. Poètica. Barcelona. Edicions UPC.

- Daumal i Domènech, F. (2000). Arquitectura, acústica. 2. Disseny. Barcelona. Edicions UPC.

- Daumal i Domènech, F. (2.007). Arquitectura, acústica. 3. Rehabilitació. Barcelona. Edicions UPC.

- Daumal, F. y Martín, V. (2014). Terapias acústicas en los trastornos del espectro autista: Aspectos del programa funcional para el desarrollo de centros específicos. Congreso Tecniacústica 2014, Murcia. (pp. 452-459). Madrid: Sociedad española de Acústica (SEA).

- Faber Taylor, A. y Kuo, F. (2008). Children With Attention Deficits Concentrate Better After Walk in the Park. Journal of Attention Disorders.

- Grandin, T. (1992). An Inside View of Autism Editorial E. Schopler and G.B. Mesibov. New York.

- Hebert, B. (2003). Design Guidelines of a Therapeutic Garden for Autistic Children, MLA Thesis, Louisiana State University.

- Johnston, B. (2012). Interview with Brian Johnston on the Landscape of Autism. Retrieved on October 2012 from Blog de ASLA. http://www.asla.org/ContentDetail.aspx?id=37601

- Kampen, M. (2011)The effect of outdoot environment on attention and self-regulation behaviors on a child with autism. Open Access Theses and Dissertations from the College of Education and Human Sciences. Paper 117.

- Lipscomb, M. y Stewart, A. (2014). Analysis of therapeutic Gardens for children with autism spectrum disorders. Perkins+Will Research Journal / 2014. Vol. 06.02.

- Martín, V. y Daumal, F. (2015). Arquitectura y Autismo: Aspectos de la investigación en el medio acústico. I Jornadas de Investigación y Doctorado: Calidad y Acreditación. Ciencias Politécnicas nº 78 - 26/6/2015. Universidad Católica San Antonio de Murcia.

- Martín, V. y Daumal, F. (2015). Consideraciones médicas y psicológicas, aplicadas a la acústica, en los espacios para personas con trastornos del espectro autista. I Jornadas Doctorales de la Universidad de Murcia. Escuela Internacional de Doctorado (EIDUM). 28 y 29 de Abril 2015.

- Mostafa, M. (2008). An Architecture for Autism: Concepts of Design Intervention for the Autistic User. International Journal of Architectural Research, 2(1), 189-211.

- Pleban, F., Barney, D. y Burke. R. (2014). Physical activity in children with autism spectrum disorders: Considerations for educational administration. Central Europen Journal of Sport Sciences and Medicine. Vol.1, Nº 1 / 2014: 15-26.

- Remington, A., Swettenham, J., Campbell, R. y Coleman, M. (2009). Selective Attention and Perceptual Load in Autism Spectrum Disorder. Association for Psychological Science.

- Rosser Sandt, D. y Frey, G (2005). Comparison of Physical Activity Levels Between Children With and Without Autistic Spectrum Disorders. Adapted Physical Activity Quaterly, 2005, 22, 146-159.

- Sachs, N., and Vincenta, T., (2010). Outdoor Environments for Children with Autism and Special Needs", Implications, Volumen 09, Nº 1.
Obtenido de http://www.informedesign.org/_news/april_v09-p.pdf.

- Schafer, R., M. (1977): The tuning of the world. Random House,

- Whitehurst, T. (2006). The impact of building design on children with autistic spectrum disorders. Good Autism Practice. Vol. 7.Issue 1. Ediciones Glenys Jones and Hugh Morgan.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CONTROL DE RUIDO EN CONDUCTOS DE AIRE MEDIANTE MICRO-ESTRUCTURAS

PACS: 43.28.-g

Herrera Martínez, Marcelo; Alvarado Huérfano, John Freddy
Universidad de San Buenaventura,
Carrera 8 H n.° 172-20 | PBX: (57) 1- 667 1090
Bogotá, Colombia
E-mail: mherrera@usbbog.edu.co

## RESUMEN

Este estudio trata acerca de la creación de sistemas ingeniosos para aeroacústica, o el control de ruido en sistemas de ventilación, sistemas de motores turbofan, y en general aeronaves. Combinando la observación, el biodiseño, y la ingeniería de sonido se ha logrado implementar el sistema que emplean las lechuzas, las cuales poseen micro-estructuras en su morfología externa para la reducción de ruido. Empleando este mismo tipo de diseño se implementaron microestructuras similares, generando un comportamiento similar por medio de micro-turbulencias en las que se eliminan gradualmente los estados estacionarios.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de aire acondicionado han traído consigo problemáticas, como es el ruido generado por los mismos. Este tipo de ruido, generado por turbinas y demás elementos incorporados a los sistemas de aire acondicionado, es distribuido por los conductos, los cuales van generando estados estacionarios, amplificando así los niveles de presión sonora, los cuales son transmitidos a recintos.

Existen actualmente soluciones parciales para la problemática de ruido, materiales absorbentes dentro de los mismos, como la lana de vidrio, diseños estructurales de los conductos de aire o modificaciones a su simetría, además de recubrimientos del mismo para disminuir la propagación del sonido, entre otros, estos sistemas comúnmente implementados sólo generan reducciones a menos que se implementen varios de estos sistemas concibiendo una mayor inversión de espacio arquitectónico empleado además de mayores inversiones económicas. Como se mencionó con anterioridad, la biónica nos permite realizar analogías entre algunas especies animales y soluciones a problemáticas que se tengan, es por esto que en la actualidad se está investigando un hecho particular de las lechuzas: el vuelo silenciado de las mismas.

Las lechuzas por su parte cuentan con micro-estructuras llamadas pennulas, las cuales son las encargadas de crear micro turbulencias que eliminan las ondas estacionarias logrando con esto un menor ruido al volar. Inspirado en esto, se implementó un sistema que simule el mismo comportamiento utilizado por las lechuzas, para reducir el exceso de ruido creado por el aire cuando este choca con un elemento de mayor densidad. Para modelar este sistema se llevaron

a cabo simulaciones, con las cuales se comprobó el comportamiento de las micro-estructuras y su atenuación, cuando estas son expuestas a un caudal de viento. Posteriormente se comprobó mediante mediciones la efectividad del sistema, donde se obtuvieron atenuaciones de hasta 30dB.

## NORMATIVA PARA PROCEDIMIENTO DE MEDICION DE EMISIÓN DE RUIDO

Por medio de la norma ISO 5136, la cual indica el procedimiento para medir emisión de ruido generada por ventiladores en ductos de aire o sistemas de ventilación, se establece el procedimiento general para el desarrollo del proyecto.

Las condiciones para la medición deben ser óptimas, para ello los niveles de ruido de fondo deben ser bajos como sugiere la norma inferiores a NC 40, esto mejorara el análisis de los datos obtenidos mediante la medición de ruido producido por el ventilador; además es importante que el lugar de experimentación sea cerrado y posea un tratamiento acústico donde sus condiciones de temperatura y humedad sean controladas.

## PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

### Simulación por software

Teniendo en cuenta el diseño preliminar realizado por software CAD, se procedió simular el comportamiento físico en el medio de las microestructuras, mediante el software COMSOL Multiphysics 5.0.

### Instrumentación

Para llevar a cabo y cumplir algunos de los objetivos planteados es estrictamente necesario emplear instrumentos y herramientas que nos facilite la captura de datos los cuales serán útiles para la investigación y posterior evaluación.
Aquellos instrumentos empleados para dicha captura fueron: Sonómetro tipo 2 con micrófono tipo 1, *Svantek 943,* utilizado con el fin de identificar los niveles de presión sonora generados en el ducto, pistófono empleado para calibrar el sonómetro mediante la medición de 94dB SPL, estación meteorológica *Vantage Vue,* la cual posee un anemómetro capaz de medir el caudal o velocidad del aire, poliuretanos cilíndricos de 8 cms de altura y 6 cms de diámetro utilizados como base del ducto para la reducción de vibraciones, ventilador axial de 5 alabes como fuente de ruido, ducto hecho en basik el cual es nuestro ducto modelo, alfileres de acero las cuáles serán las micro-estructuras y computador empleado para simulación descarga y procesamiento de datos obtenidos.

### Componentes del sistema

Para determinar las medidas del sistema a implementar en ductos de ventilación que no posean elementos atenuadores, es necesario simular las condiciones a las cuales van a ser expuestas las micro-estructuras y así realizar mediciones para comparar con los datos de predicción realizados mediante la simulación.

Para este proyecto de investigación se realizaron mediciones en ductos de 30 cms y 100 cms, sin elementos atenuadores, donde fueron implementadas micro-estructuras y posteriormente se realizaron mediciones de presión sonora y caudal de aire a la salida del ducto.

Se realizaron simulaciones en el software COMSOL Multiphysics 5.0, para predecir el comportamiento físico-acústico de las micro-estructuras en ductos de aire, teniendo en cuenta que las características del ducto están fuera del método planteado por normas o por Randall Barron (Barroun, 2002), ya que el sistema no tiene en cuenta elementos de atenuación como forma, uniones, codos o rejillas, las cuales generan en cada banda de frecuencia alteraciones que afectan el análisis del sistema.

Para realizar las mediciones, se debe tener en cuenta la relación señal ruido (donde la señal es la generada por el ventilador la cual es distribuida a lo largo del ducto) y el ruido de fondo es aquel que se captura sin que el sistema esté activo; el ruido de fondo debe ser bajo para optimizar así el análisis y que este no altere el análisis por dicho ruido. Algunas de las recomendaciones establecidas por normativa son: es necesario que el sistema esté separado de paredes o elementos de alta densidad que provoquen reflexiones; para esto el lugar donde se realizarán las mediciones debe tener tratamiento acústico o estar separados 1 mt como mínimo.

**Población y muestra**

Se realizaron mediciones en el estudio de grabación híbrido en la Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá, empleando bases de la norma 5136 en cada medición; se ajustaron 2 posiciones para cada medición y 3 repeticiones en cada una de ellas (una de referencia y dos con las cuales fueron empleadas para la recolección de datos). De acuerdo con esto la población obtenida es la medición realizada en el estudio de grabación y la muestra es la misma, ya que no fue alterado el lugar de medición.

**Simulación y modelado**

Para comprobar de manera visual el comportamiento de las micro-estructuras encaminadas a obtener información aeroacústica y, facilitar diferentes análisis que permitan distinguir o exaltar las propiedades de cada turbulencia o micro-turbulencia creada, se generan variaciones de posición cantidad y espesor escalando al modelo original de las lechuzas mediante el empleo del software COMSOL Multiphysics. En esta plataforma de simulación se logró implementar distintos tipos de flujos, cada uno con un comportamiento particular con la finalidad de poner a prueba las propiedades atenuantes de las micro-estructuras en un ducto, dichas simulaciones se presentan a continuación.
Para comprender el proceso de simulación se requieren 4 pasos fundamentales:

- **Geometría:** En este paso se modificará toda la geometría y composición del elemento a simular, Comsol posee una plataforma de construcción y modelamiento gráfico por medio de coordenadas o figuras de dimensión modificable y no mediante líneas como lo son los programas CAD comunes; además, este software posee la capacidad de importar modelos construidos desde plataformas como lo es AutoCAD.

- **Materiales:** Comsol posee la capacidad de simular condiciones de contorno, las cuales dependerán directamente de los materiales empleados en nuestro objeto geométrico, cada material asignado contiene propiedades físicas modificables como lo puede ser temperatura, densidad, viscosidad dinámica, coeficiente termodinámico, módulo de Young entre otros, las cuales serán fundamentales para observar el comportamiento de nuestro modelo.

- **Física:** Se dice que este es el paso principal o base de la simulación, donde Comsol tiene su mayor desempeño y desarrollo ya que posee gran cantidad de estudios multi-físicos los cuales ayudan a comprender el comportamiento de nuestro modelo. En este paso se selecciona el estudio físico a desarrollar donde eligen varios elementos: el modelo físico empleado, las entradas y salidas de nuestro elemento viscoso seleccionado, las paredes u otros elementos a los cuales se va a enfrentar el objeto. Los estudios elegidos para simular este proyecto fueron:

    - Presión acústica, Frecuencia (acpr)
    - Presión acústica, Transiente (actd)
    - Flujo laminar (spf)
    - Flujo turbulento K-épsilon (spf)
    - Aeroacústico (ae)

- **Enmallado:** Antes de ejecutar la simulación es necesario que el software comprenda todo nuestro objeto, para esto se extiende una malla sobre el objeto la cual puede cambiar en cuanto definición; esto para hacer más detallado el estudio (aunque modificará la relación en tiempo de simulación). En cuanto a forma, la malla podrá definir su geometría, esta modificación dependerá del modelo ya que en algunas aristas o bordes, la malla no será la adecuada, por lo tanto no se tendrá una correcta simulación.

**Primera simulación**

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento del perfil aerodinámico de una sola micro-estructura, y los diferentes puntos de presión máxima y mínima arrojando valores entre 1.6 y 0 respectivamente como se ve en la Figura No. 1.a), los datos de presión en el aire son:

**Segunda simulación**

Como se puede observar en la Figura No. 1.b), en la simulación se generan mínimos de presión, donde las micro estructuras fueron situadas, aunque la micro turbulencia presente entre micro-estructuras no es completada se asume que esta distribución no es la deseada, ya que no se comporta de una manera aerodinámica turbulenta si no como un muro virtual, el cual desperdiciará las características de la micro-estructura.

Posteriormente, para determinar la posición correcta que se empleará en la instalacion de micro-estructuras en el ducto, se distanciaron gradualmente entre si para observar el comportamiento, cuando estas sean sometidas a un caudal de aire, nuestra primera variación se observa en la Figura No. 2.a).

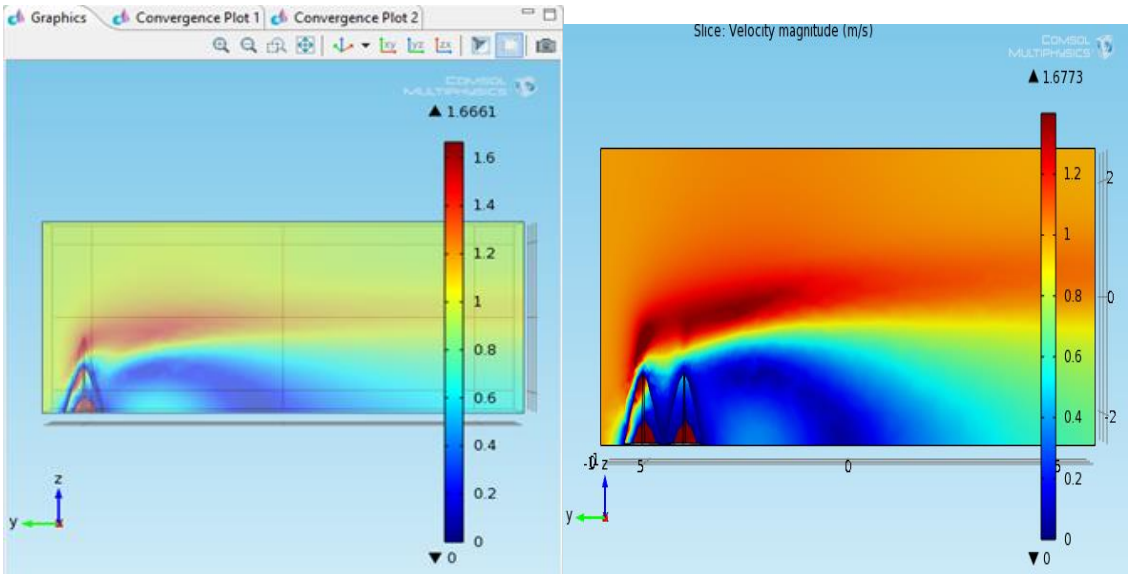



Figura No. 1.a) Primera simulación muestra en detalle Micro-estructura. b) Simulación con separación 0 cm entre Micro-estructuras.

**Tercera simulación**

Modificando las variables de distancia en el eje Y, se modifican los resultados de turbulencia en este caso la distancia entre micro estructuras es de 1 cm.

En esta simulación, se observa la interacción entre micro-estructuras donde el ciclo turbulento se completa entre estas dos, generando mínimos de presion entre ellas y máximos en su límite vertical. Consecuentemente, se observa una campana aeroacústica, donde el flujo laminar se convierte en flujo turbulento.

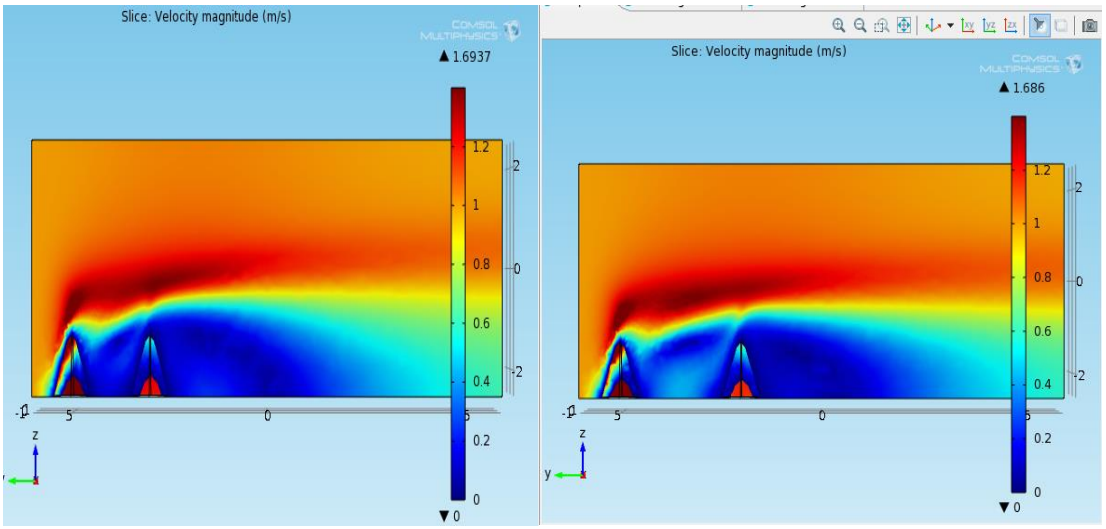



Figura No. 2.a) Simulación con separación 1 cm entre Micro-estructuras. b) Simulación con separación 2 cm entre Micro-estructuras.

**Cuarta simulación**

Modificando nuevamente las variables de distancia en el eje Y, donde en este caso se alteró la distancia entre microestructuras siendo en esta ocasión de 2 cm.

Se observa en la figura No. 2.a) el perfil aerodinámico de las microestructuras, donde al ser separadas más de 1 cm, empiezan a generar atenuaciones de presión parcial y no un mínimo a cero (0), tal como se desea. De igual manera, la campana aeroacústica, posterior a las micro-estructuras, aumentó su longitud.

**Quinta simulación**

Modificando nuevamente las variables de distancia en el eje Y, donde en este caso se alteró la distancia entre micro estructuras siendo en esta ocasión de 3 cm.

En la figura No. 3.a), la distancia aumentó al mismo tiempo que las disminuciones parciales aumentaron entre microestructuras, siendo de tan sólo 0.6 Pascales, su atenuación en presión. Se generaron entre micro-estructuras, movimientos turbulentos similares a un perfil alar.

Luego de obtener el comportamiento ideal para la atenuación de ruido en un solo eje, se dispone aumentar la cantidad gradualmente en el mismo eje para así comprobar el comportamiento de dos o más micro-estructuras. Como se puede observar en las figuras No. 3.a) y 3.b), las micro turbulencias generadas entre micro estructuras se mantienen, generando mínimos de presión a medida que el caudal de aire se enfrenta a ellas.

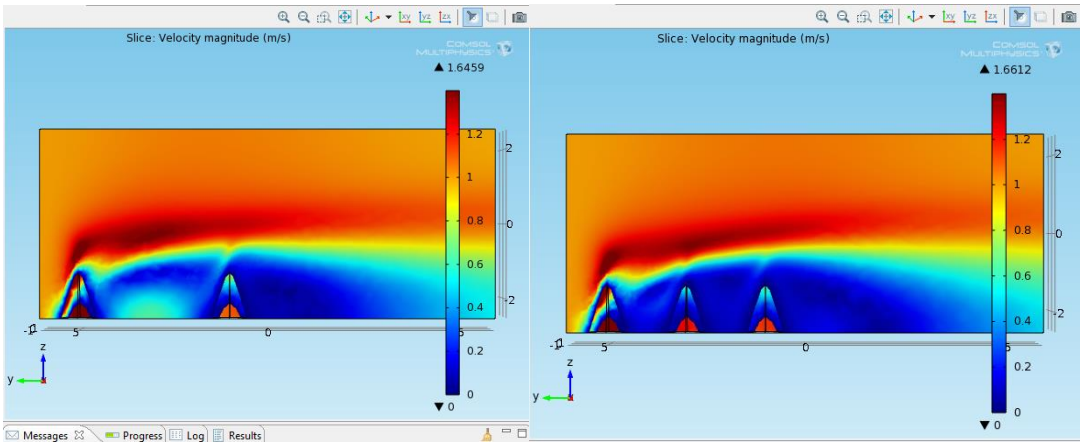



Figura No. 3.a) Simulación con separación 3 cm entre Micro-estructuras. b) Simulación de 3 Micro-estructuras con separación 1 cm entre ellas.

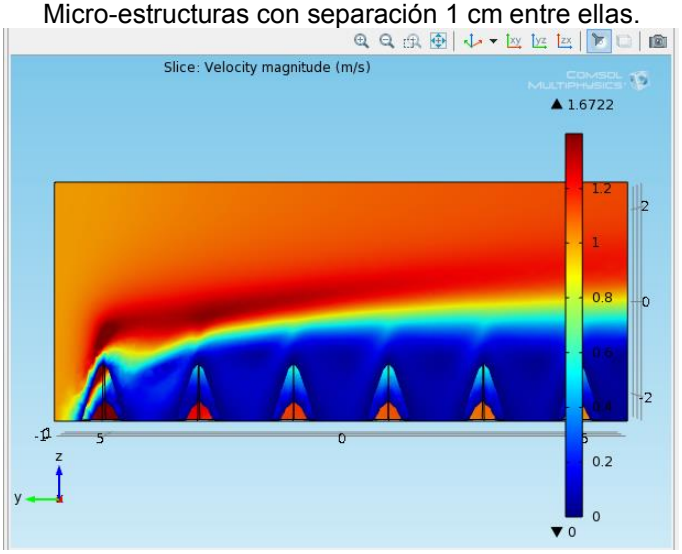



Figura No. 4. Simulación de 6 Micro-estructuras con separación 1 cm entre ellas.

Luego de obtener el comportamiento ideal para la atenuación de ruido en un solo eje, se dispone a modificar las otras caras del ducto para aumentar o comprobar el comportamiento del aire con las micro-estructuras.

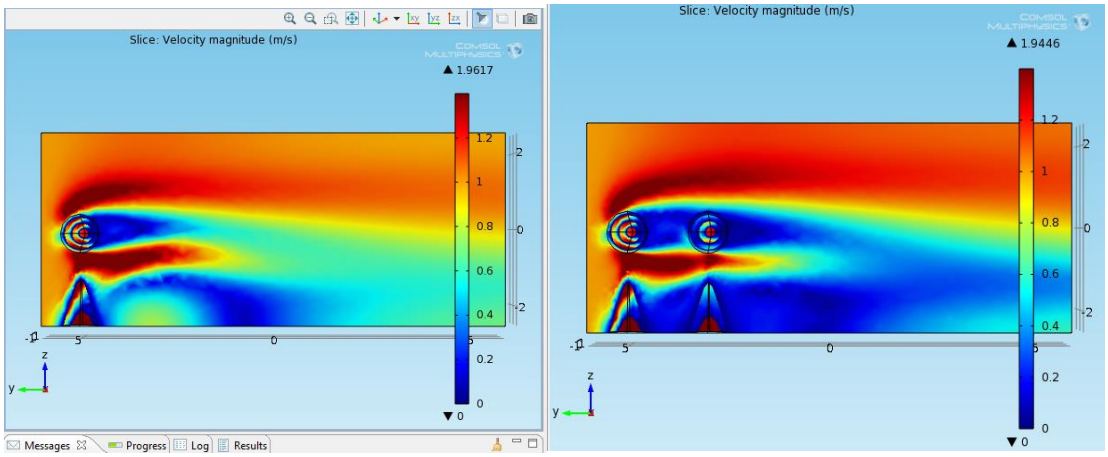



Figura No. 5.a) Simulación en detalle de Micro-estructuras modificando 2 ejes. b) Simulación en detalle de 2 Micro-estructuras en cada eje modificado.

En esta simulación mostrada en la figura No. 5, se evidencia la campana aeroacústica generada por la micro-estructura ubicada en el eje Y, con la adición de una micro-estructura en el eje Z. El comportamiento se modifica ya que el máximo de presión es distribuido aumentando así la longitud de la campana de atenuación aeroacústica.
Adaptando la distribucion ideal obtenida al variar la distancia la cual es una separacion de 1cm se implementan las micro-estructuras laterales con la misma separación.

El comportamiento generado por esta distribución se encuentra en la figura No. 5, donde se evidencia la ampliación en las zonas de mínimos de presión, distribuyéndola de forma más uniforme a través del ducto. En el caso de los máximos de presión, fueron enfocados a un punto axial con respecto al caudal de aire.

**Simulación final de atenuación**
Luego de obtener la correcta distribución de micro estructuras se dispuso a simular el modelo en 3D; esto para ahorrar memoria del dispositivo y llevar a cabo la simulación, la cual es bastante compleja, donde sólo se introdujeron dimensiones de posición y cantidad de micro estructuras, las cuales no eran graficadas en un plano geométrico. El resultado de la simulación no generó una gráfica; sólo arroja resultados de niveles de presión sonora.

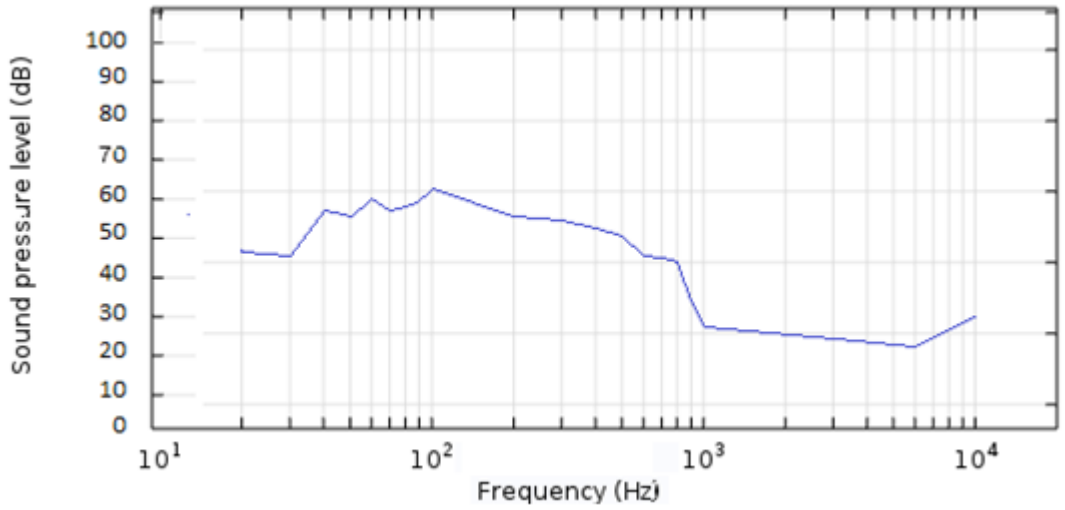



Figura No. 6. Resultados obtenidos en escala logarítmica mediante simulación

Al implementar las micro-estructuras en un ducto con un largo de 30cms, en dos de sus caras, se comprobó la efectividad de éstas, sumando una totalidad de 600 microestructuras que generó considerables atenuaciones alcanzando los 40 dB en bandas de baja frecuencia entre 25Hz y 315Hz, con menores atenuaciones entre bandas de frecuencias medias como 630Hz a 2000Hz, y atenuaciones de tan solo 10dB en frecuencias altas superiores a 4000Hz.

**Conclusiones**

Como resultado de la investigación presentada, es posible concluir que existen otros métodos no comprobados a la hora de tratar el ruido generado en ductos de ventilación, esto con el fin de hacer óptimo los recintos con fines específicos donde se encuentre sistemas HVAC. Estos métodos o sistemas innovadores vienen determinados desde la concepción de su diseño, ya sea por las dimensiones ubicaciones o cantidad en el caso de las micro-estructuras como fue comprobado para controlar su carácter acústico.
Al comparar los resultados obtenidos en este proyecto se puede observar que mediante la implementación de micro-estructuras, se pueden generar atenuaciones significativas en niveles de presión sonora alterando así el comportamiento acústico en los ductos de aire, donde los estados estacionarios sufren alteraciones modificando así la distribución de presión sonora a lo largo del ducto.
En este proyecto se presentó la emulación, simulación y comportamiento de un sistema compuesto por micro-estructuras cuya finalidad específica consiste en la reducción de niveles de presión sonora, sustentado por una variedad de simulaciones aeroacústicas.

**Bibliografía**

R. F. Barroun. Industrial Noise Control and Acoustics, CRC Press, Nov 14, 2002.

On Sound Generated Aerodynamically. I. General Theory. M. J. Lighthill.

M. J. Lighthill, “On Sound Generated Aerodynamically. Part II: Turbulence as a Source of Sound,” Proceedings of the Royal Society London, Vol. 264, 1954, pp. 321-342.

Analysis and Characterization of Flow-Generated Sound, Dominik Surek, KEYWORDS: Fluid Flow, Fluids, Akustics, Spectrum, Wavelets, in “American Journal of Computational Mathematics”, Vol.3 No.4, December 23, 2013.

Handbook of Acoustics. Malcolm J. Crocker, A Wiley Interscience-Publication. ISBN 0471-25293-X.

G. Muller and M. Moser (eds.), Handbook of Engineering Acoustics, DOI 10.1007/978-3-540-69460-1_2. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2013.

The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound. N. Curle. Published: 20 September 1955.DOI: 10.1098/rspa.1955.0191.

# EFFECTS UPON URBAN NOISE OF THE PRIORITIZATION OF BUSES AT INTERSECTIONS

PACS numbers: 43.50.Lj 43.50.Rq 89.40.Bb

Alina Mihaela Petrovici[1]; José Luis Cueto Ancela[2]; Ricardo Hernández Molina[2], Diego Sales Marquez[2], Diego Sales Lerida[2], Javier Priego Ramirez[2]
(1) "Vasile Alecsandri" University of Bacau
Calea Mărăşeşti, no. 157, Bacău, 600115
Tel. ++40-234-542411, tel./ fax ++40-234-545753
E-Mail: alinapetrovici@ub.ro
(2) Universidad de Cádiz. Laboratorio de Ingeniería Acústica.
Edificio C.A.S.E.M. Campus Río San Pedro
11500. Puerto Real.
Tel / Fax: 956016051
E-Mail: joseluis.cueto@uca.es

**Abstract**

The urban noise action plans based on traffic management usually incorporate the evaluation of the effectiveness of this kind of mitigation measures on an estimated basis. This is clearly shown at intersections where the dynamic behavior of all the vehicles that are part of the fleet a can influence environmental noise locally. In this paper, we try to generalize by microscopic traffic simulations and calculations of sound power associated with the road, the best strategy (from the acoustic point of view) to prioritize public transport at intersections located in a main artery.

Keywords: Intelligent Transportation Systems, traffic noise, traffic microsimulation systems.

**Resumen**

Los planes de acción del ruido urbano basados en la gestión del tráfico suelen incorporar la evaluación de la eficacia de las medidas adoptadas de manera estimativa. Esto se muestra claramente en las intersecciones donde el comportamiento dinámico de todos los vehículos que forman parte del tráfico en estas intersecciones puede influir de manera importante en el ruido ambiental a nivel local. En este trabajo, tratamos de generalizar por simulaciones de tráfico microscópicos y cálculos de potencia acústica asociados a la vía, la mejor estrategia (desde el punto de vista acústico) para priorizar el transporte público en las intersecciones ubicadas en una gran arteria.

Palabras clave: Sistemas de Transporte Inteligente, ruido de tráfico, Modelos de microsimulación de tráfico

## INTRODUCTION

People often prefer traveling with their own cars, because it is much more comfortable and they can reach closer to their destinations. However, when it comes to the biggest cities, the situation it´s much more complicated. More cars, more traffic congestions, more air and noise pollution, more wasted time and fuel, less parking places etc.

From many points of view (economic, social and cultural development of the cities), congestion is a major problem. Every day are wasted millions of hours in traffic jams and the noise and air pollution resulting from the continual growth of the number of cars in traffic are seriously affecting the quality of urban life [1] [2].

In order to convince people to change their habits when it comes to travel, there are several strategies regarding traffic management. One of them is the guarantee of an efficient mobility system in urban public transport. According to the European Environmental Agency, the noise measures related to traffic management planned in the EU agglomerations have a rate of approximately 20% [3]. The traffic management measures have a high diversity and the assessment of their effects on noise involve paying high attention to the following issues: traffic volume, traffic composition, speed and driving pattern [4].

In relation with traffic management in the Smart Cities has been introduced into the agglomerations Intelligent Transportation Systems (ITS) technologies. There is a potential improvement of the environmental health in Smart Cities through the use of ITS technologies. A review over the environmental factors in ITS has demonstrated how vehicle technologies and ITS can play an important role in reducing the impact of traffic on the environment and health, and in the development of long-term sustainability of towns and cities [5]. This paper put the focus upon the strategies supported by traffic management and the consequences of these strategies on the environmental noise.

One of the possible tasks of the ITS technology is to promote public transit for example the adoption of Transit Signal Priority (TSP) strategies through traffic-signal controlled intersections [6] [7].

Transit Signal Priority is an operational strategy that facilitates the movement by improving speed and reliability of transit vehicles, either buses or trams, through traffic-signal controlled intersections. This strategy can be implemented by establishing a communicative link between the approaching transit vehicle and the traffic signal [8].

There are many organizations that support the prioritization of public transport in cities in order to establish a fast and reliable environmentally friendly mode of transport. Public transport is less flexible and often the journeys lasts longer because many times doesn`t go directly to the traveler's destination. As a result, buses and trams are often not seen as a real alternative to the car. Cities can fix this problem by creating priority systems for public transport at traffic lights. These priority systems can provide significant benefits in terms of reliability and can reduce the loss of time, especially during peak hours, making public transport even faster [9].

One of the most effective ways to evaluate the measures applied on traffic management is by using micro-simulation models in which can be represented different types of traffic scenarios from a road network. Modelling traffic simulation is becoming one of the most widely used tool in many transportation researches and studies [10] [11] [12] [13] [14]. In a micro-simulation model, the passage of individual vehicles through a network is described in much detail, using a large range of vehicle parameters [15] [16] [17]. Through modelling a road network can be evaluated scenarios, which have been generated and then, help transport managers in operational and planning studies. This is a helpful tool for short, medium and long-term studies even if it is not a perfect representation of the reality [19].

## OBJECTIVES

The main objective of this study is to find the best ITS strategy (from the acoustic point of view) to prioritize public transport at intersections taking into consideration different traffic scenarios.

## METHODOLOGY

### *Traffic microsimulation description*

The basic tool employed in this study is a microscopic, behavior-based multi-purpose traffic and transit simulation model called: VISSIM. This traffic-engineering tool can analyze complex traffic and transit operations including various levels of transit priority treatment at signalized intersections. VISSIM can analyze traffic data and bus signals operations because contains an external signal state generator (VAP) that allows for the analysis of user-defined signal control logic [19] [20] [21]. This logic depends on the signal provided by the data extracted from some traffic detector. This information could include the detection of number of passing-by of certain vehicles, headway and occupancy. With a VAP logic acting on every scenario it can be calculated the mobility performance of the ITS [22] and the consequences on environmental noise [6].

In order to build a VISSIM model some elements are needed [23]:

- Network geometry (links, nodes);
- Traffic demand - traffic flows (generators, routes), traffic compositions;
- General traffic characteristics (desired speed decisions, priority rules and stop signs);
- Traffic signals (detectors, traffic controllers, signal phases and signal heads);
- In addition, we introduce the driving behavior to explore their effects on noise emissions.

In this paper, we use VISSIM to estimate the sound power associated with the road. Our interest focuses around the noise impact of traffic interaction between busses and the rest of traffic modes in signalized intersections. Doing so, the best strategy (from the acoustic point of view) to prioritize public transport at intersections could be evaluated. The study includes the following tasks:

- The junction is composed by 2 arms:
  - The main road of 1 Km length composed by 3 lanes with the traffic circulating in the direction E-W;
  - The secondary road at the junction is a 2 lanes arm with the traffic circulating in the direction S-N;
  - Both roads have a dedicated bus lane, which is the right lane.
- The traffic demand is variable for the different scenarios;
- Traffic signal cycle length is also variable during the tests;
- The bus prioritization has always the same logic;
- The driving behavior of private vehicles is taken into account and remain the same during simulations. We divide this private mode in aggressive, normal and calm drivers/cars;
  - Decision of changing the lane for overtaking is allowed.

The set of traffic parameters analyzed is as following:

- Traffic light:
  - Fixed time cycles: 60 s, 90 s and 120 s. Effective Green is in every case the 50% of the cycle (relation between green and full cycle) neglecting the safety time and the reaction time to the red-green shift which is usually set at 2 seconds;
  - Bus Signal Prioritization (BSP) is funded in the previous fixed time cycles. The BSP logic is programmed with VAP and is very simple. When there

are no buses around the intersection, the traffic signal control performs as a fixed time control. Then the relation between reds and greens between the main and the secondary arm remain 50%-50%. When a bus is detected on 40 meters upstream of the traffic signals, the logic has to decide if introduce an "early green" or not. This happens only if the green has a minimum length of 10 s. So, the prioritization is not carried out when the minimum green is less than 10 s;
    - For comparison the free flow is also simulated;
- Demand (vehicles per hour). The traffic demand is estimated considering the capacity of a road. In general, this capacity can be estimated through different ways; one of them is the following:

$$C = N \bullet S \bullet {}^{V}\!/_{T_{ciclo}} \quad (1)$$

where *C* is the capacity (vehicles/hour);
*S*: Saturation intensity (vehicles / lane / hour);
*N:* Number of lanes;
V: Effective Green (seconds);
$T_{ciclo}$: Time of the cicle (seconds).

For each lane can be established some correction factors which include: number of lanes, their width, percentage of heavy vehicles, slope gradient, movements/hour in a parking (in case that the road has one), bus stops/hour, if the road is situated in the center of the town or in other areas, if there are lanes reserved for certain movements of traffic, the proportion of vehicles turning right and left, etc. In this study it is chosen S= 2100 veh/h/c without any correction factor [6] and it is assigned the demand to satisfy the levels of service. We understand "level of service" (LOS) from now on, the relationship between the demand "D" and the capacity "C". In this case, considering an artificial road of 2 lanes and the main traffic light defined previously, the two demands analyzed stay as it follows:
    - for a D/C= 045 (free flow) D=475 veh/c/h. D=950 veh/h;
    - for D/C= 0,9 (near saturation) D= 950 veh/c/h [6]. The demand D= 1900 veh/h proved to be a pragmatic figure according to the expectations for the VISSIM simulation;
- Flow type:
    - Random;
    - Platoons;
- Composition of the fleet:
    - Main road (link 1): Cars with calm behavior: 0,14-0,16 %; Cars with normal behavior: 0,64-0,65% Cars with aggressive behavior: 0,14-0,16 % and Buses: 0,03-0,06 % (60-120 buses/h);
    - Secondary road (link 2): 60 buses/h.

***Road noise power estimation***

The output of the simulation consist in the following variables sampled second by second:

- Type of vehicle (bus/car) and type of behavior (aggressive, normal and calm car);
- Acceleration of every vehicle in the network in m/s2;
- Speed of every vehicle in the fleet in Km/h;
- The position of every single vehicle during the time of simulation;
- The time of the simulation.

The propulsion noise power is defined by the following equation [6] [13]:

$$L_{WP}(f) = A_P(f) + B_P(f) \bullet \left( \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) + C_P \bullet a \quad (2)$$

where $L_{WP}$ is the propulsion noise power, $A_P B_P C_P$: Coefficients that will change for each frequency band in octaves for each vehicle category; v: Speed of the vehicles; $V_{ref}$: Reference speed; and $a$: Acceleration of the vehicle.

The rolling noise is defined by the following equation [6] [13]:

$$L_{WR}(f) = A_R(f) + B_R(f) \bullet \log_{10}\left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (3)$$

where $L_{WR}$ is the rolling noise power; $A_R$, $B_R$: Coefficients that will change for each frequency band in octaves for each vehicle category; V: Speed of the vehicle; and $V_{ref}$; Reference speed.

## RESULTS AND DISCUSSION

By combining traffic parameters, there were generated 40 cases. From these cases we have chosen the most relevant ones in order to establish some general rules. The set of figures presented below shows the noise power emissions due to traffic along the main road (250 meters upstream and downstream the traffic signal control situated in the junction). The rolling noise is represented by the red color and the engine noise in blue.

Although we have analyzed the influence on noise of certain traffic parameters as:

- Type of flow: random vs. platoons
- Length of the cycles
- Traffic demand
- Behavior of the cars

In this paper we focus on the influence of prioritization of busses respect to the regular fixed time program of the traffic signals. The analysis of all the cases show a pattern. This pattern is presented below through the comparisons of the cases 6 and 46, 9 and 49: Free flow graphics are also introduced in order to illustrate the influence of the different signaled junctions.

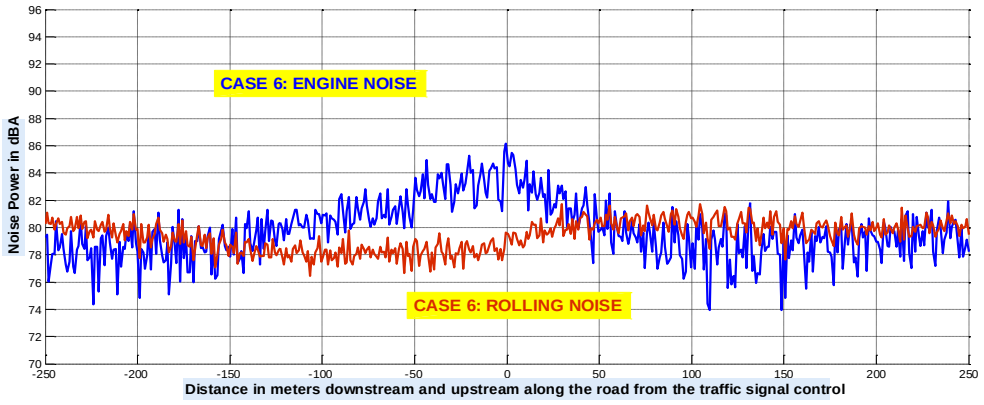



Figure 1 –Case 6: BSP programmed in VAP, random traffic. Cycle: 60 s. Main road demand: 1900 veh/h., from which 120 are buses.

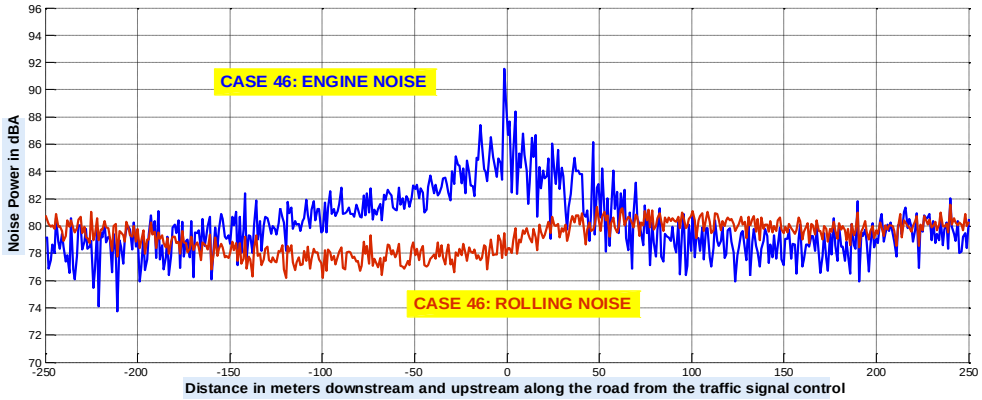



Figure 2 –Case 46: The traffic simulation parameters are exactly the same as case 6, except that this time is a fixed time program.

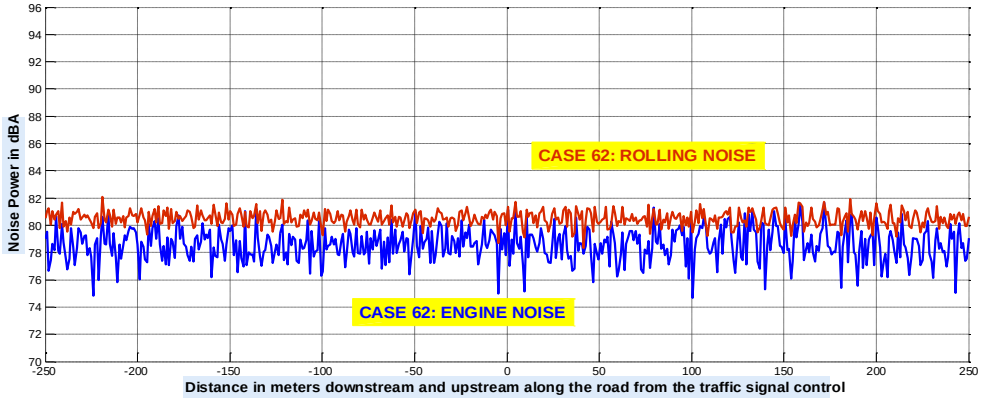



Figure 3 –Case 62: Graphical representation of the noise power level of free traffic flow, keeping the same parameters as in the cases: 6 and 46.

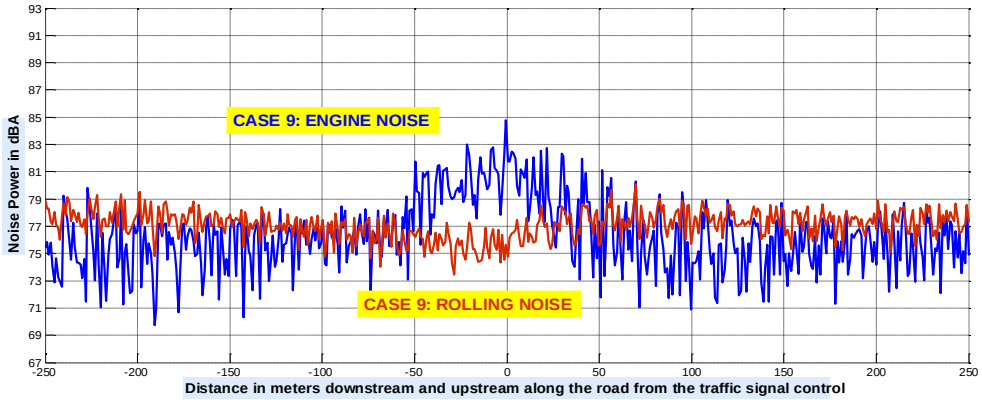



Figure 4 –Case 9: BSP programmed in VAP, random traffic. Cycle: 120 s. Main road demand: 950 veh/h., from which 120 are buses.

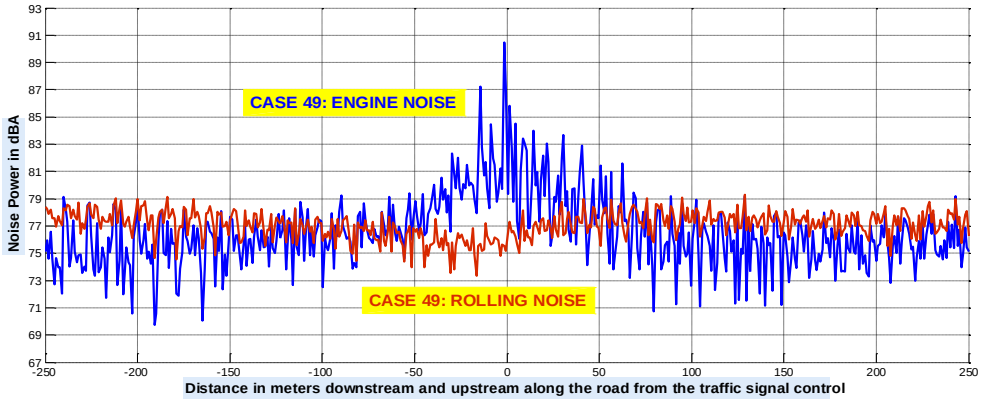



Figure 5 –Case 49: The traffic simulation parameters are exactly the same as case 9, except that this time is a fixed time program

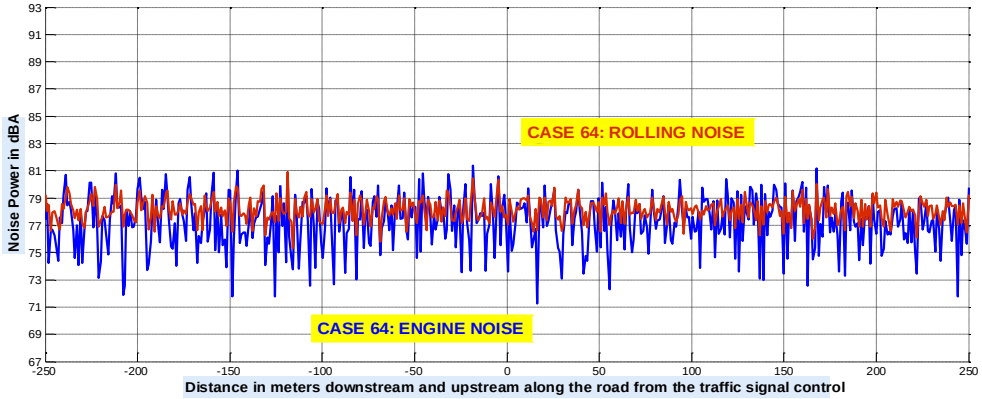



Figure 6 –Case 64: Graphical representation of the noise power level of free traffic flow, keeping the same parameters as in the cases: 9 and 49.

What we can observe in the analysis of all simulations with BSP and Fixed Time is that in a general manner the noise in the proximity of the traffic light is always higher in the FIXED TIME cases. This can be checked in the presented graphics (1 to 4). In these cases the engine noise power is the average during all the simulation time (This includes all the stages of the traffic lights). This means that in these graphics aren`t represented just the most important noise events which take place during stop and go behavior.

More buses more noise problems in Fixed traffic lights. This is not applicable to the BSP cases.

## CONCLUSIONS

- Regarding the type of flow: (random vs. platoons). It can be observed that the noise upstream is less when the traffic flow is in platoons
- Regarding the length of traffic light cycles. It can be observed when the cycles are larger, the noise power increased upstream traffic signal control. This statement is true for fixed traffic regulation and BSP.
- Regarding density of the flow. When the level of service is lower (but without reaching traffic jam) the noise is relatively lower (of course, taking into account the density) when compare with lower traffic demand.
- Regarding BSP logic. BSP solves the problem of noise, promotes the public transport, without causing any type of negative secondary effects on the mobility of the private traffic.

## REFERENCES

1. A Congestion-Free Bus Network, International Association of Public Transport, December 2001 - http://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/01%20A%20CONGESTION-FREE%20BUS%20NETWORK.pdf
2. Ashish Bhaskar, Edward Chung, Olivier de Mouzon André-Gilles Dumont, Methodology for Travel Time Estimation on a Signalised Arterial, Young Researchers Seminar, 2007.
3. Report 11/2013. A closer look at urban transport. TERM 2013: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe, [EEA] European Environment Agency http://www.eea.europa.eu/EEA http://www.eea.europa.eu/, 2013;
4. SILENCE Effectiveness and Benefits of Traffic Flow Measures on Noise Control, European Commission Dg Research Sixth Framework Programme Priority 6 Sustainable Development, Global Change & Ecosystems Integrated Project – Contract N. 516288
5. Margaret Bell, Environmental factors in intelligent transport systems, IEE PROCEEDINGS - INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS · JULY 2006
6. José Luis Cueto Ancela; Ricardo Hernández Molina, Francisco Fernández Zacarías, Intersecciones semaforizadas en la ciudad y ruido ambiental, TecniAcustica, Valladolid, 2013
7. Prioritisation of public transport in cities, CIVITAS
8. Harriet R. Smith, Brendon Hemily, Miomir Ivanovic, Gannett Fleming, Transit Signal Priority TSP A Planning and Implementation Handbook
9. Prioritisation of public transport in cities, CIVITAS
10. Bert De Coensel, Dick Botteldooren, Filip Vanhove, Steven Logghe, Microsimulation Based Corrections on the Road Traffic Noise Emission Near Intersections, Acta Acustica United with Acustica Vol. 93 (2007) 241 – 252;
11. Bert De Coensel and Dick Botteldooren, Traffic signal coordination: a measure to reduce the environmental impact of urban road traffic?, inter-noise 2011, Osaka japan September, 4-7;
12. Bert De Coensel, A.L. Brown, Deanna Tomerini, Dick Botteldooren, Modeling road traffic noise using distributions for vehicle sound power level, inter-noise 2012, august 19-22, new York;
13. B. De Coensel, A. Can, B. Degraeuwe, I. De Vlieger, D. Botteldooren, Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions, Environmental Modelling & Software 2012, 1-10;
14. E. Chevallier, A. Can, M. Nadji, L. Leclercq, Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics, Université de Lyon
ENTPE / INRETS - Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transport;
15. Paul Stuart Goodman, B.Eng.(Hons), The Prediction of Road Traffic Noise in Urban Areas, 2001;
16. Serge P. Hoogendoorn, Piet H.L. Bovy, State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling, , Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering;
17. Erin Ferguson N. Nezamuddin, ManWo Ng, S. Travis Waller, Guidance for feasibility analysis of candidate sites: handbook, TxDOT Project 0-5913: Feasibility of Speed Harmonization and Peak Period Shoulder Use to Manage Urban Freeway Congestion SEPTEMBER 30, 2009;
18. Emmanuel Bert, Dr Edward Chung, Prof. A.-G. Dumont, Conference paper STRC 2007. 7th Swiss Transport Research Conference. Dynamic Origin-Destination Matrices Estimation Method for urban networks;
19. Managed Lanes-traffic modeling/ Steven Venglas, David Fenno, Samir Goel, Paul Schrader, Operating freeways with Managed Lanes
20. Martin Fellendorf and Peter Vortisch, Chapter 2, Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM pg. 1
21. Antonios Chaziris, Development of a new pro-active vehicle actuated signal control strategy - Evaluation on an urban intersection in Athens, University of Twente, master thesis, 11 April 2011
22. VISSIM Vehicle Actuated Programming (VAP) tutorial, 2006
23. Aleksandar Stevanovic Peter T. Martin, Integration of SCOOT & SCATS in VISSIM Environment., PTV Users Group Meeting, May 2007;

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CARACTERIZACIÓN DE EMISORES ACÚSTICOS INDUSTRIALES Y ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

**PACS: 43.50.jh**

Notario Tévar, Antonio
Datakustik GmbH
C/ Calera 3, Loft 49
28760 Tres Cantos
España
+34 91 219 08 78
antonio.notario@datakustik.com

**ABSTRACT**

There is a number of calculation methods widely used to predict the noise from industrial sources such as ISO 9613-2 or the recent CNOSSOS-EU calculation method. In either case, the general problem is to decide about the input data of the relevant industry noise sources, such as emission values or directivities. This paper addresses solutions for common challenges such as the unavailability of source´s data, strategies applied to improve existing methods and the arrangement of the acoustical model with an efficient structure, allowing the fast comparison of different scenarios.

**RESUMEN**

Existe un gran número de métodos de cálculo empleados para predecir el ruido procedente de emisores industriales, tales como la ISO 9613-2 o el más reciente CNOSSOS-EU. En cualquier caso, el problema común es la caracterización de dichos emisores en el caso de desconocer parámetros primordiales como sus valores de emisión o la directividad. Este trabajo muestra posibles alternativas a situaciones comunes como la no disponibilidad de datos de fuentes acústicas, estrategias para mejorar métodos existentes y la estructuración eficiente del modelo acústico con el fin de permitir la comparación de escenarios.

## INTRODUCCION

En la gestión del impacto acústico producido por instalaciones industriales se aplican métodos de cálculo ampliamente usados como el ISO9613-2 o el más reciente CNOSSOS-EU, desarrollado por la Comisión Europea. Sea como fuere, uno de los principales problemas en todo caso es decidir los parámetros de entrada correctos a fin de definir la emisión sonora de las fuentes de ruido.

El procedimiento más razonable de obtener espectros de emisión sonora es efectuar mediciones en fuente, aunque se espera disponer de una base de datos predefinida en caso de que no sea posible la medida in situ. Por otro lado, existen situaciones especiales en las que la recolección de datos es extremadamente compleja, como por ejemplo la emisión de ruido a través de ventanas o superficies cuyo origen es el interior de naves industriales, o sistemas complejos donde no es posible la medición directa.

Por último, después de que las emisiones hayan sido determinadas e introducidas en el modelo, el escenario actual es calculado y los niveles de presión sonora resultantes evaluados. En este punto, la planificación de nuevos escenarios debe incluir las futuras medidas de reducción de ruido, que pueden ser aplicadas tanto en el receptor como directamente en fuente (por ejemplo, la modificación de las condiciones de operación de las máquinas).
El presente trabajo enumera algunos de los métodos disponibles para la determinación de las emisiones industriales así como sugiere herramientas adicionales de aplicación en la planificación de emplazamientos industriales.

## DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE LAS FUENTES DE RUIDO

En la mayoría de los métodos de cálculo, la emisión acústica de las fuentes se define como el nivel de potencia sonora direccional emitido por banda de frecuencia. Los emisores industriales pueden definirse como fuentes puntuales, lineales o superficiales. En cualquier caso, la emisión debe incluir las superficies reflectantes cercanas a la fuente real tal y como se define en la ISO 96143 (en ruido industrial, las superficies reflectantes más relevantes son el terreno debajo de la fuente y cualquier superficie vertical cercana y situada en dirección opuesta a la trayectoria entre fuente y receptor).
En caso de que los niveles de potencia sonora no estén disponibles, deben realizarse mediciones. Por ejemplo, CNOSSOS-EU aconseja hacer uso de los siguientes métodos de medición para obtener espectros de potencia sonora apropiados para su uso en el cálculo del ruido industrial:

- Sound pressure enveloping surface method (ISO 3744 and 3746)
- Reverberation room method (ISO 3741)
- Reference sound source method (ISO 3747)
- Intensity method (ISO 9614 1-3)
- Multi-source industrial plants (ISO 8297)
- Transmission outdoors (EN 12354-4)

## DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE FUENTES PUNTUALES BASADA EN MEDICIONES

Una fuente puntual es una representación elemental de una fuente de ruido ideal situada en el espacio, y está caracterizada por el nivel de potencia sonora $L_W$. En caso de que dicho $L_W$ no esté disponible, puede calcularse a partir del nivel de presión sonora $L_p$. En esta situación, pueden darse diversos casos. Por ejemplo, si la distancia de medida es mayor en comparación con las dimensiones de la fuente, y su radicación no es direccional, el nivel de potencia sonora puede calcularse de acuerdo a la fórmula (1):

$$L_W = L_p + 10\lg\left(\frac{4\pi r^2}{m^2}\right) + 10\lg\left(\frac{n\%}{100\%}\right) \quad (1)$$

$L_W$: nivel de potencia sonora en la frecuencia f en dB
$L_p$ = nivel de presión sonora a la distancia r y en la frecuencia f en dB
r: distancia de medida en m
n%: proporción de la esfera completa en %

En caso de que la radiación sea direccional, deben medirse varios puntos a la misma distancia de la Fuente, obteniendo el espectro medio energético de los espectros obtenidos. En caso de que las medidas se hayan realizado sobre una superficie envolvente el nivel de potencia Sonora puede calcularse con la Ecuación (2):

$$L_W = L_p + 10\lg\left(\frac{S}{m^2}\right) + K \quad (2)$$

$L_W$: nivel de potencia sonora en la frecuencia f en dB
$L_p$: nivel de presión Sonora promedio en la superficie S y en la frecuencia f en dB
S: superficie S envolvente in m²
K: corrección de campo cercano

La corrección de campo cercano ha de especificarse en caso de que los vectores de intensidad Sonora no atraviesen la envolvente perpendicularmente, o cuando el nivel de presión sonora haya sido obtenido cerca de la superficie (por tanto, la distancia r < longitud de onda), provocando un error de campo cercano. Los estándares ISO 3744/3745/3746 proporcionan información acerca de la magnitud de ambos errores y cómo reducirlos. En caso de haber medido la intensidad sonora en lugar del nivel de presión sonora (e.g. ISO 9614), se evitan dichos errores.

**Determinación de la emisión de fuentes lineales**

Las fuentes lineales se emplean en caso de que su dimensión mayor sea más de ½ de la distancia emisor - receptor. Pueden emplearse para representar fuentes tales como cintas de transporte, tuberías, etc. Por tanto, se emplea el nivel de potencia sonora por unidad de longitud LW´. También pueden emplearse para modelar maquinaria móvil la cual ha de estar relacionada con su nivel de potencia sonora LW. La potencia por unidad de longitud se deriva de la velocidad y el número de eventos que suceden (tráfico):

$$L_W{}' = L_{W\,pt} + 10 \cdot \lg\left(\frac{Q}{h^{-1}}\right) - 10 \cdot \lg\left(\frac{v}{km/h}\right) - 30dB \tag{3}$$

**Emisión de emplazamientos industriales multi - fuente**

Los emisores superficiales se emplean para determinar el nivel de potencia sonora en una gran variedad de situaciones. Una de las aplicaciones es la determinación de la potencia de plantas industriales que generalmente incluyen multitud de emisiones. Este caso particular es relevante cuando dichas plantas industriales son parte de modelos más extensos (e.g. una ciudad), y por tanto el tráfico rodado suele ser el emisor más importante. Por otro lado, estas áreas industriales no se modelan teniendo en cuenta todas y cada una de las fuentes en el interior, y las mediciones no son posibles en muchos casos. Por tanto, la única posibilidad es realizar mediciones en el límite de la parcela que contiene la industria.

En este caso, se puede estimar el nivel de potencia Sonora por unidad de área mediante el cálculo de valores en los receptores situados en la misma posición que las medidas reales. Para ello se emplea una potencia arbitraria o “test”. Después del cálculo, han de promediarse tanto los resultados calculados como los valores de medición y obtener el nivel de potencia sonora estimado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$L_{W,unknown}{}'' = L_{W,test} + \bar{L}_{p,measured} - \bar{L}_{p,calculated}dB \tag{4}$$

$L_{W,test}$: nivel de potencia sonora arbitrario en dB
$L_{p,\,measured}$: nivel de presión sonora promedio en los puntos de medición
$L_{p,\,calculated}$: nivel de presión sonora promedio en los puntos de cálculo

En la Fig. 1, se muestra el resultado de la estimación de un emplazamiento industrial de acuerdo a esta técnica. Tras aplicar la Ecuación (4) los niveles de presión sonora se recalculan a partir del nivel de potencia corregido.

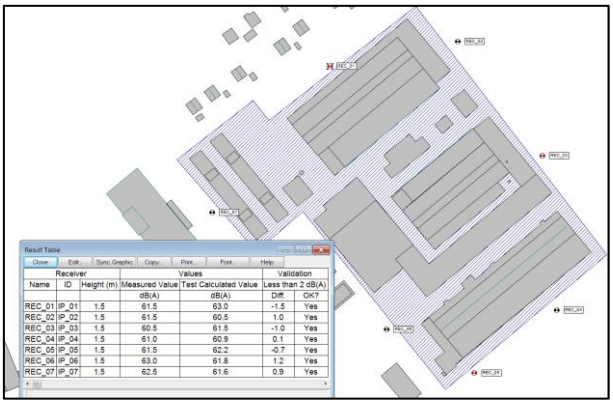



**Fig. 1**: Emplazamiento industrial multi-fuente simulado con un emisor superficial. La emisión resulta de la estimación a partir de mediciones en los límites de la industria

En el ejemplo mostrado en la Fig.1, el nivel de potencia sonora ha sido calculado mediante la Ecuación (4). La tabla muestra la diferencia entre los valores medidos y los calculados.

### Calculo de niveles de potencia sonora basados en el nivel interior de salas industriales

Los emisores superficiales verticales se emplean comúnmente para calcular la radiación de edificios industriales a partir de los niveles de presión sonora que han sido medidos o calculados en su interior.

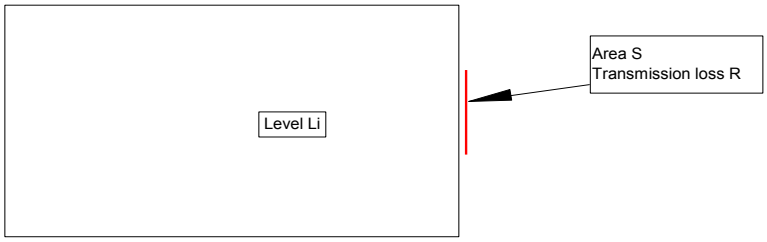



**Fig.2 –** Parámetros de entrada para el cálculo del nivel de potencia sonora de una superficie radiante basado en el nivel interior de una sala industrial y la pérdida de transmisión

Si no hay disponibilidad de mediciones en el interior, puede calcularse el nivel interior en campo difuso de acuerdo a la teoría estadística de la reverberación acústica en salas:

$$L_i = PWL - 10\lg\left(\frac{\alpha * S}{m^2}\right) + 6dB \tag{5}$$

$L_i$: nivel interior de la sala por frecuencia en dB
PWL: nivel de presión sonora de todas las fuentes presentes en la sala, en dB
A: área de absorción media por banda de frecuencia en $m^2$
α: coeficiente de absorción media de las superficies de la sala
S: área de las superficies de la sala en $m^2$

El nivel de potencia Sonora radiado por el elemento superficial S (m²), por banda de frecuencia es:

$$L_W = L_i - R - 6 + 10 \cdot \lg(S) \tag{6}$$

Lw: nivel de potencia sonora por unidad de superficie
R: pérdida de transmisión de la pared por banda de frecuencia

## CORRECCIÓN POR TIEMPO DE OPERACIÓN

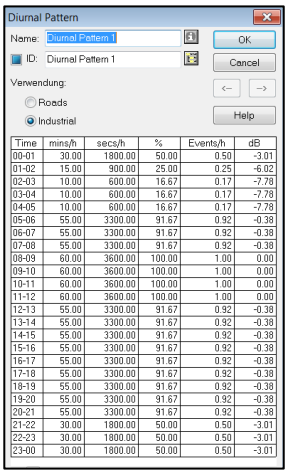
Independientemente de la potencia sonora, métodos como CNOSSOS-EU[2] incluye un número de parámetros de entrada considerados como esenciales. Esto significa que el rango de valores que el parámetro puede tomar puede hacer variar los valores de Lden o Lnight en más de ±2 dB(A) para un intervalo de confianza del 95%. Estos parámetros incluye el tiempo de operación (annual para los periodos día, tarde y noche), posición (x, y, z), dimensiones y orientación, directividad y condiciones de operación. La corrección por tiempo de operación puede calcularse mediante la fórmula (7)

$$C_W = 10\lg\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{7}$$

T: periodo de actividad anual de la fuente por periodo , en horas
T0: period de referencia expresado en horas (día: 12 horas, tarde: 4 horas, noche: 8 horas)

La corrección por tiempo de operación se implementa en el software CadnaA[6] por medio del uso de patrones diarios:

El patrón diario puede ser introducido como los minutos (o segundos) de operación, el porcentaje de tiempo en el cual la máquina está funcionando, el número de eventos/hora o la corrección final en dB. Una vez el patrón diario ha sido asignado a una Fuente, el parámetro adicional L1hMax (hora más ruidosa por periodo D, E, N) puede ser seleccionado y calculado.




| Time | mins/h | secs/h | % | Events/h | dB |
|---|---|---|---|---|---|
| 00-01 | 30.00 | 1800.00 | 50.00 | 0.50 | -3.01 |
| 01-02 | 15.00 | 900.00 | 25.00 | 0.25 | -6.02 |
| 02-03 | 10.00 | 600.00 | 16.67 | 0.17 | -7.78 |
| 03-04 | 10.00 | 600.00 | 16.67 | 0.17 | -7.78 |
| 04-05 | 10.00 | 600.00 | 16.67 | 0.17 | -7.78 |
| 05-06 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 06-07 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 07-08 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 08-09 | 60.00 | 3600.00 | 100.00 | 1.00 | 0.00 |
| 09-10 | 60.00 | 3600.00 | 100.00 | 1.00 | 0.00 |
| 10-11 | 60.00 | 3600.00 | 100.00 | 1.00 | 0.00 |
| 11-12 | 60.00 | 3600.00 | 100.00 | 1.00 | 0.00 |
| 12-13 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 13-14 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 14-15 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 15-16 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 16-17 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 17-18 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 18-19 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 19-20 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 20-21 | 55.00 | 3300.00 | 91.67 | 0.92 | -0.38 |
| 21-22 | 30.00 | 1800.00 | 50.00 | 0.50 | -3.01 |
| 22-23 | 30.00 | 1800.00 | 50.00 | 0.50 | -3.01 |
| 23-00 | 30.00 | 1800.00 | 50.00 | 0.50 | -3.01 |

## TÉCNICAS ADICIONALES DE CÁLCULO DE EMISIONES INDUSTRIALES

Como se ha podido ver en los párrafos anteriores, existe un número considerable de metodologías de medición aplicables al ruido industrial. Dichos estándares son considerados como las mejores prácticas para la determinación de niveles de potencia sonora, para diferentes tipos de fuentes industriales. Desafortunadamente, en ocasiones dichos métodos no están pensados para la obtención de datos aplicables al cálculo de mapas de ruido. Por otro lado, los métodos descritos pueden mejorarse gracias al uso de soluciones basadas en software con el fin de obtener los datos de entrada precisos y por tanto, obtener un modelo más realista.

### Cálculo de potencia sonora a partir de parámetros técnicos de fuentes

Uno de estos ejemplos es el cálculo de la emisión de fuentes a partir de parámetros técnicos. El software CadnaA[6] incorpora un módulo (SET) gracias al cual la potencia sonora puede ser calculada en función de los valores de parámetros tales como la capacidad nominal (en el caso de un motor). Esta característica puede ser empleada para calcular automáticamente niveles de potencia Sonora de fuentes, así como para estimar la transmisión entre elementos de un sistema.

### Optimización de emisores en emplazamientos multi-fuente

Otro ejemplo es el de la optimización automática de niveles de potencia sonora en emplazamientos industriales multi-fuente. Cuando la emisión de un emplazamiento industrial es desconocida, los valores de emisión de las diferentes áreas pueden ajustarse para permitir el nivel de potencia sonora máximo sin exceder un valor límite, que puede ser un límite establecido en la normativa o una medición real.

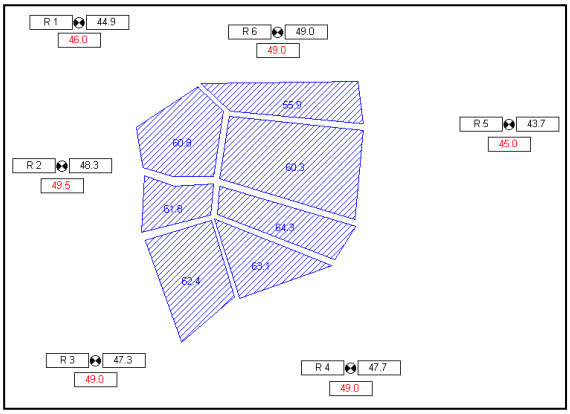



**Fig.5 –** Optimización automática de emisores superficiales; los resultados de las mediciones se muestran en color rojo, mientras que los valores en color negro son calculados basándose en niveles de potencia sonora optimizados para siete emisores superficiales con emisión desconocida.

### Cálculos ruido interior – ruido exterior

Anteriormente se ha explicado un procedimiento para estimar niveles de potencia sonora emitida al exterior a partir de niveles en el interior de una sala industrial. No obstante, el cálculo de niveles interiores mediante la teoría estadística no considera la geometría de la sala así como otros efectos producidos por los obstáculos (difracción, absorción local, transmisión y dispersión), los cuales son relevantes para la obtención de resultados precisos. Una solución podría pasar por obtener un modelo interior detallado y generado en un software de predicción de ruido interior[7] que esté conectado al modelo de cálculo de ruido exterior. La siguiente ilustración muestra un modelo acústico detallado de una sala industrial, donde sus elementos (paredes, fuentes de ruido, obstáculos, etc.) han sido modelados con precisión. La superficie radiante ha sido cubierta por un array de receptores distribuidos homogéneamente por la superficie. Dicha superficie es asimismo modelada en CadnaA.

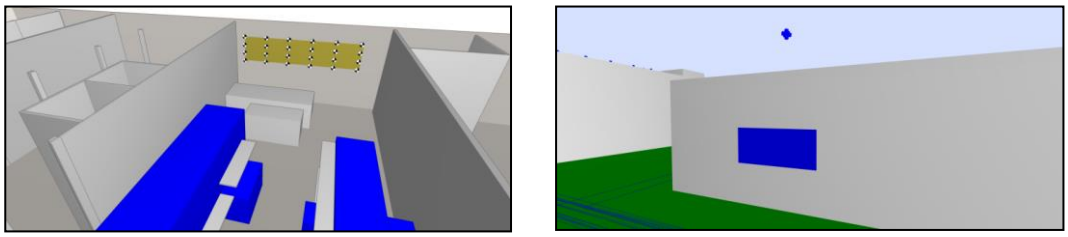


**Fig.6 – (Izda.)** Modelo interior de una sala industrial en CadnaR[7] **(Dcha.)** Superficie radiante vertical modelada en el software de predicción CadnaA[6]

Después del cálculo de niveles en los receptores interiores, se determina y se exporta el valor medio a CadnaA.

*Tabla 1 – Resultados en el array de receptores*

| | Niveles de Presión Sonora (dB) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Receptor** | **125** | **250** | **500** | **1000** | **2000** | **4000** |
| **RP_01** | 70,30 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,2 | 69,8 |
| **RP_02** | 69,40 | 69,4 | 69,3 | 69,3 | 69,2 | 68,9 |
| **RP_03** | 69,80 | 69,8 | 69,8 | 69,7 | 69,6 | 69,3 |
| **RP_04** | 69,90 | 69,9 | 69,9 | 69,8 | 69,7 | 69,4 |
| **RP_05** | 69,90 | 69,9 | 69,9 | 69,8 | 69,7 | 69,4 |
| **RP_06** | 69,00 | 69 | 69 | 68,9 | 68,8 | 68,5 |
| **RP_07** | 71,40 | 71,4 | 71,3 | 71,3 | 71,2 | 70,8 |
| **RP_08** | 70,70 | 70,7 | 70,6 | 70,6 | 70,5 | 70,2 |
| **RP_09** | 71,30 | 71,3 | 71,2 | 71,2 | 71,1 | 70,7 |
| **RP_10** | 71,40 | 71,4 | 71,4 | 71,3 | 71,2 | 70,9 |
| **RP_11** | 71,20 | 71,2 | 71,2 | 71,1 | 71 | 70,7 |
| **RP_12** | 70,50 | 70,5 | 70,5 | 70,4 | 70,3 | 69,9 |
| **RP_13** | 71,30 | 71,3 | 71,3 | 71,2 | 71,1 | 70,8 |
| **RP_14** | 70,60 | 70,6 | 70,6 | 70,5 | 70,4 | 70,1 |
| **RP_15** | 71,20 | 71,2 | 71,2 | 71,1 | 71 | 70,7 |
| **RP_16** | 71,20 | 71,1 | 71,1 | 71,1 | 71 | 70,6 |
| **RP_17** | 70,90 | 70,9 | 70,8 | 70,8 | 70,7 | 70,3 |
| **RP_18** | 70,50 | 70,5 | 70,4 | 70,4 | 70,3 | 69,9 |
| **RP_19** | 71,30 | 71,2 | 71,2 | 71,2 | 71,1 | 70,7 |
| **RP_20** | 70,60 | 70,5 | 70,5 | 70,5 | 70,4 | 70 |
| **RP_21** | 70,90 | 70,9 | 70,9 | 70,8 | 70,7 | 70,4 |
| **RP_22** | 71,00 | 71 | 70,9 | 70,9 | 70,8 | 70,4 |
| **RP_23** | 70,90 | 70,9 | 70,8 | 70,8 | 70,7 | 70,3 |
| **RP_24** | 70,30 | 70,3 | 70,2 | 70,2 | 70,1 | 69,7 |
| **Nivel Medio** | **70,65** | **70,63** | **70,60** | **70,55** | **70,45** | **70,10** |

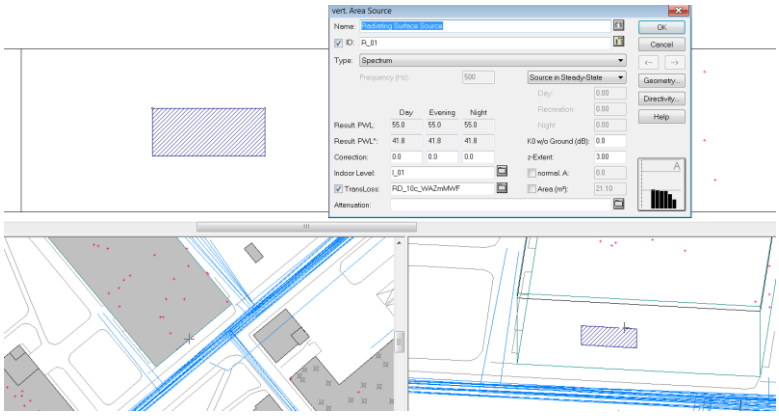
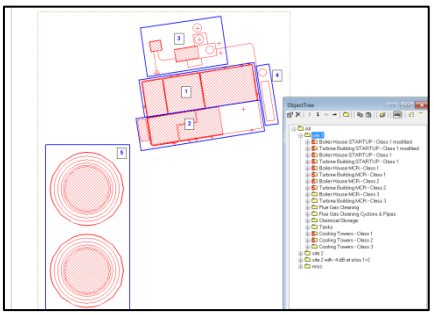


**Fig.8 –** Determinación del nivel de potencia sonora a partir del nivel de presión sonora previamente importado y de la pérdida de transmisión

## PLANIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

Durante la planificación de plantas industriales, deben estudiarse varias medidas contra el ruido. Como ejemplo, un modelo de planta de energía se muestra para ilustrar la organización llevada a cabo. Cada sección se organiza mediante una estructura de carpetas jerárquica. Esto permite modificar aspectos



como las condiciones de operación o cambiar sistemas desde un mismo modelo. En el ejemplo, existen 3 tipos de reducción provocado por el cambio de las condiciones de operación (Clase 3: sin reducción; Clase 2: Reducción de 3 Db; Clase 3: Reducción de 6 dB). Esta organización permite comparar variantes y comprobar la efectividad de las medidas mas  En las figuras inferiores se comparan dos situaciones. El color rojo significa que ninguna medida ha sido aplicada a los sistemas correspondientes, mientras que los colores verde y amarillo significan que se han aplicado las medidas de clase 2 ó 3. Este planteamiento del problema permite optimizar la solución final con el fin de reducir el ruido en los receptores hasta alcanzar niveles compatibles, con el menor coste posible.

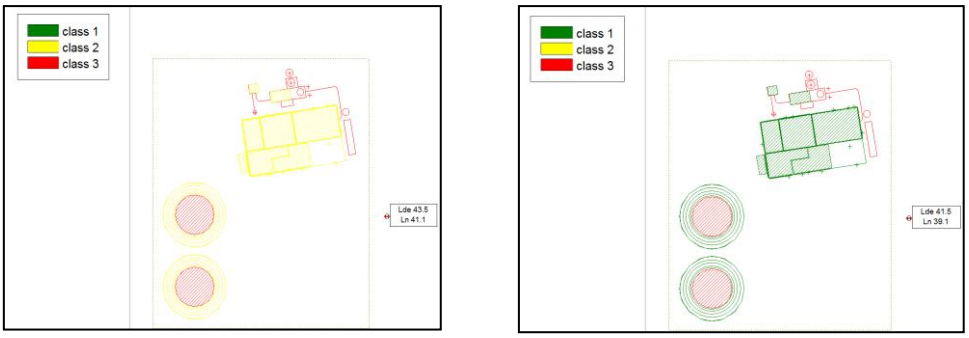



**Fig.9 –** Comparación entre dos escenarios: Reducción clase class 1 (Izda.) vs. Clase 2 (Dcha.)

## REFERENCIAS

1. ISO 9613, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2 (1996-12): General method of calculation,

2. European Commission, *CNOSSOS-EU JRC Reference Report*, (2012)

3. ISO 3744 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering method in an essential free field over a reflecting plane

4. ISO 3746:2010, Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane

5. ISO 8297:1994, Acoustics -- Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment -- Engineering method

6. DataKustik GmbH, "CadnaA – Software for Environmental Noise", www.datakustik.com

7. DataKustik GmbH, "CadnaR – Software for Interior Sound", www.datakustik.com

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MEJORA DE LA EFICACIA EN LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE BAJA FRECUENCIA

PACS: 43.50.Rq

Robert Barti
Asesor y consultor acústico
RBD acoustic engineering
Calle La Vinya, 32
08041 Barcelona
España
Tl: +34 619 983 384
E-mail: robert@rbd.com

## ABSTRACT

In the last edition of Tecniacústica 2010, the problem of the unreliability of the methods currently used for the evaluation of low-frequency components under current legislation was discussed. On that occasion an initial approach based on the loudness of noise was presented, for the evaluation of low-frequency components of a sound that was aimed at a better correlation with the subjective evaluation indicator. The work presented in this occasion, adds more cases that allows for a greater degree of reliability, and seems to show better results than actual procedures. This paper presents the results obtained and compared with existing indicators.

## RESUMEN

En la pasada edición del Tecniacústica 2010, se expuso el problema de la poca fiabilidad de los métodos actualmente utilizados para la evaluación de las componentes de baja frecuencia según la Legislación vigente. En esa ocasión se presentó una primera aproximación de un indicador basado en la sonoridad, para la evaluación de las componentes de baja frecuencia de un sonido que apuntaba a una mejor correlación con la valoración subjetiva. El trabajo presentado en esta ocasión, añade más casos lo que permite disponer de un mayor grado de fiabilidad, y parece ofrecer unos resultados más. Esta comunicación presenta los resultados obtenidos y se comparan con los indicadores estándar actuales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más comunes en las quejas por ruido, suele ser la percepción de sonidos procedentes de actividades o de vecinos, en el dormitorio, lo que impide o dificulta conciliar el sueño. En particular la baja frecuencia suele ser el peor caso ante el que nos podemos encontrar. Es una señal que en general es difícil localizar su procedencia, lo que genera una mayor irritación sobre las personas afectadas. La descripción que realizan los afectados es bastante coincidente en la mayoría de casos. Se describe el ruido percibido como un sonido ensordecedor y en ocasiones con la sensación de temblores (vibraciones). Esta descripción encaja muy bien con la sensación que produce un sonido donde la energía acústica se concentra en las bandas de baja frecuencia. Además los afectados suelen comprobar sin entender por qué sucede, cómo el sonido se percibe

en unas zonas con mayor intensidad que en otras, lo que genera mayor confusión. Los efectos de la baja frecuencia difieren de los ruidos de espectro amplio, y distintos trabajos de investigación muestran que un sonido con un elevado contenido de baja frecuencia es más molesto que un sonido con el mismo nivel de presión acústica pero sin baja frecuencia. (Persson et al. 1990).

La penalización de un ruido por considerar la presencia de componentes de baja frecuencia es de vital importancia en niveles de inmisión en espacios cerrados. Para una zona sensible como un dormitorio, el límite máximo de inmisión permitido se sitúa en 25 dB(A). Teniendo en cuenta que el límite inferior del equipo de medida se sitúa generalmente entorno a los 18 dB(A), queda muy poco margen para dirimir si un ruido supera o no el límite establecido. Nótese que la penalización por componentes de baja frecuencia según las legislaciones vigentes, establece un escalado de 3 dB o 6 dB, que se suman algebraicamente al nivel sonoro medido. Es por tanto relativamente fácil que el nivel evaluado, supere el máximo permitido de 25 dB(A), si se aplica una penalización.

## 2. EVALUACIÓN DE LAS COMPONENTES DE BAJA FRECUENCIA.

### 2.1. Presencia de componentes de baja frecuencia según RD 1367/2007.

La metodología descrita en el anexo IV, parte de la medición simultánea de los niveles de ruido expresados en dB(A) y dB(C). En general cuanto mayor sea la diferencia entre ambos indicadores, mayor proporción de baja frecuencia respecto las frecuencias medias y altas y por tanto mayor percepción de los graves. El método expuesto en el anexo IV determina Lf, como la diferencia entre $L_{eqC}$ - $L_{eqA}$ debidamente corregidos por el ruido de fondo. Cuando esta diferencia es inferior a los 10 dB, se considera que no hay percepción de componentes de baja frecuencia. Cuando este indicador está entre 10 y 15 dB, se considera que hay una percepción neta, y cuando se superan los 15 dB, se considera que la percepción es fuerte. Este procedimiento no tiene en cuenta las condiciones acústicas del entorno ni el espectro de ruido residual, que altera a la capacidad sensitiva del oído.

### 2.2. Presencia de componentes de baja frecuencia según D176/2009.

La metodología utilizada de base es la misma del RD 1367/2007, pero limita la banda de frecuencias entre 20 Hz y 160 Hz. El método tiene dos partes: en un primer paso, se considera que no hay percepción de baja frecuencia si el desnivel $L_{eqC} – L_{eqA}$ (20Hz-160Hz) es menor de 20 dB. Caso de obtener un desnivel superior se aplica al nivel sonoro sin ponderar, un segundo criterio basado en la audibilidad del sonido según norma ISO 226:2003. Se determina el índice $L_B$ como la suma del contenido energético de las bandas que superan el umbral audible. Finalmente se considera que no hay percepción de baja frecuencia si $L_B$ es menor de 25 dB. Se considera percepción neta cuando este indicador se encuentra entre 25 y 35 dB, y se considera una percepción fuerte para niveles de $L_B$ superiores a los 35 dB.

Ambos métodos parten del valor energético del ruido, corregido por el ruido de fondo, para evaluar la presencia de componentes de baja frecuencia. Estos métodos se basan en el valor energético absoluto, y no tienen en cuenta el nivel del ruido de fondo, como referencia. Respecto de la sensación humana, la sensación de molestia de un ruido se rige más bien por la diferencia de niveles, es decir de la inmisión respecto del ruido de fondo. Por lo tanto, aunque el espectro presente un valor energético absoluto elevado, no significa que su contenido de baja frecuencia sea elevado.

## 3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE BAJA FRECUENCIA.

No existe ningún método aceptado como modelo o estándar. Existen distintos métodos que tratan de dar respuesta a éste problema. La tabla siguiente resume los métodos más importantes.

| PAIS | PUNTOS MEDIDA | UBICACIÓN PUNTOS | PUNTO EN ESQUINA | RANGO FRECUENCIAS | DIST. MIN. PAREDES | ALTURA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alemania | 1 | 1 tecnico | | 10 - 80 | | |
| Austria | 1 | 1 tecnico | | 10 - 80 | | |
| Dinamarca | 3 | 2 usuario | 1 | 5 - 160 | 0,5 | |
| España | 3 + | 3 técnico | | 20 - 20.000 | 1 | 1,2 - 1,5 |
| Finlandia | multiples | usuario | | 20 - 200 | 1 | |
| Holanda | 1 | 1 tecnico / usuario | 1 opcional | 20 - 100 | 0,2 a 0,5 | |
| ISO 16032 | 3 | 2 usuario | 1 | 20 - 200 | 0,1 | 0,1 |
| Japón | 1 | 1 usuario | | 10 - 80 | | |
| Suecia | 3 | 2 usuario | 1 | 31,5 - 200 | 0,5 | 0,6-1,2-1,6 |
| USA | multiples | | preferentemente | | | |

Aunque se aprecian diferencias entre los distintos métodos de medida, hay algunos aspectos que son bastante coincidentes. Por ejemplo, el margen de frecuencia se centra generalmente de 20 a 200 Hz, los puntos de medida son múltiples, y las distancias a los elementos constructivos suelen ser menores de 1 m. Resulta destacable que en algunos de estos métodos, los puntos de medida los fija o determina el afectado. Las mediciones en las esquinas, siempre presentan niveles de baja frecuencia superiores a otros puntos dentro del recinto. En éste aspecto no hay unanimidad, probablemente porque en general los puntos donde se encuentran mayoritariamente las personas no suelen ser las esquinas de los recintos, por lo que hacer una medición en la esquina, no nos indica el grado de afectación real al que se ve sometida la persona afectada.

Respecto de los niveles máximos permitidos para las distintas bandas de frecuencia, no todos los métodos establecen un límite máximo. La tabla siguiente resume los niveles máximos permitidos para distintas legislaciones.

| Hz | ISO 226 | Nº9 1997 Dinamarca | SP INFO 1996:17 Suecia | Defra 2005 Reino Unido | DIN 45680 Alemania 1997 | DIN 45680* Alemania 2013 | Holanda | Finlandia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | | | | | 103 | 100 | | |
| 10 | | 90,4 | | 92 | 95 | 92 | 92 | |
| 12,5 | | 83,4 | | 87 | 87 | 84 | 88 | |
| 16 | | 76,7 | | 83 | 79 | 76 | 84 | |
| 20 | 78,5 | 70,5 | | 74 | 71 | 68,5 | 74 | 74 |
| 25 | 68,7 | 64,7 | | 64 | 63 | 58,7 | 64 | 64 |
| 31,5 | 59,5 | 59,4 | 56 | 56 | 55,5 | 49,5 | 55 | 56 |
| 40 | 51,1 | 54,6 | 49 | 49 | 48 | 41,1 | 46 | 49 |
| 50 | 44 | 50,2 | 43 | 43 | 40,5 | 34 | 39 | 44 |
| 63 | 37,5 | 46,2 | 41,5 | 42 | 33,5 | 27,5 | 33 | 42 |
| 80 | 31,5 | 42,5 | 40 | 40 | 33 | 21,5 | 27 | 40 |
| 100 | 26,5 | 39,1 | 38 | 38 | 33,5 | 16,5 | 22 | 38 |
| 125 | 22,1 | 36,1 | 36 | 36 | | 12,1 | 18 | 36 |
| 160 | 17,9 | 33,4 | 34 | 34 | | | 14 | 34 |
| 200 | 14,4 | | 32 | | | | 10 | 32 |
| 250 | 11,4 | | | | | | | |

Resulta bastante obvio que los niveles de baja frecuencia medidos dependen en gran medida de la posición elegida. Para valorar la molestia generada por la baja frecuencia, los promedios entre distintas mediciones no son adecuados, ya que las personas presentes en los puntos de mayor nivel no se benefician de que en otros puntos el nivel sonoro sea inferior. Por esto parece que lo más aconsejable sea escoger los puntos allí donde el usuario manifiesta que oye el ruido con más intensidad. (Simmons C. 1997). Pedersen propone un método donde se mide únicamente en las cuatro esquinas del recinto, se realiza un promedio energético buscando el máximo valor y se le resta 4 dB. Las incertidumbres asociadas a este método son muy bajas, y hay una buena correlación con la molestia. Sin embargo la distribución de energía de baja frecuencia no siempre es simétrica y por otro lado los resultados prácticos muestran que con éste método, en general se sobrevaloran los niveles percibidos por los afectados. Los casos prácticos que se muestran en este trabajo se han medido en las posiciones donde las personas afectadas manifiestan que se oye el ruido con mayor intensidad.

## 4. PERCEPCIÓN DE COMPONENTES DE BAJA FRECUENCIA.

El oído interno dispone de dos tipos de células ciliadas: las células ciliadas interiores (CCI) y las células ciliadas exteriores (CCE). Las CCI no están acopladas mecánicamente a la membrana tectónica, son sensibles a la velocidad de las vibraciones, haciéndolas insensibles a bajas frecuencias. Las CCE son mucho más numerosas están acopladas mecánicamente a la membrana tectónica, y son sensibles al desplazamiento haciéndolas sensibles a las bajas y muy bajas frecuencias. Las CCE están conectadas al cerebro mediante la vía aferente de tipo II que puede introducir atenuación en las bajas frecuencias. Esta misma vía aferente es la utilizada para las señales de alarma y los tinnitus. Algunos trabajos (Krahé 2010) muestran que el contenido de las medias y altas frecuencias enmascara la percepción de las bajas frecuencias.

Las quejas por percepción de baja frecuencia han aumentado notablemente en los últimos años, en la mayoría de países de la UE. Este fenómeno se debe a que la población se ha vuelto más sensible? Hay un incremento de los niveles de baja frecuencia? Sin duda el uso abusivo de la

ponderación A ha tenido algo que ver, ya que esta ponderación atenúa fuertemente el nivel de baja frecuencia por lo que los resultados obtenidos no se ajustan a la realidad (Persson et Al. 1990, Berglund et Al. 1995, Barti 1995, Krahé 2008). Por otro lado el aislamiento de la construcción en la UE ha mejorado en las últimas décadas. Mirando con detalle, las mejoras de las soluciones constructivas y de los nuevos materiales, se han traducido en un incremento del aislamiento al ruido aéreo de las bandas de medias y altas frecuencias. Esto ha hecho disminuir el ruido en ambiente interior en estas bandas de frecuencias, pero se ha mantenido el de baja frecuencia, lo cual empeora la sensación de molestia por baja frecuencia percibido por las personas (Krahé 2008). Diversos estudios (Barti 1999, IPSOS 2003,...) evidencian que la población joven presenta un notable grado de deterioramiento auditivo, disminuyendo la sensibilidad auditiva a medias y altas frecuencias. Curiosamente la mayoría de quejas por percepción de baja frecuencia proviene de gente adulta entre 50 y 70 años. Nótese que estas personas no tienen la agudeza auditiva de la adolescencia, y por ello sufren más ante las señales de baja frecuencia.

La principal característica de la baja frecuencia es su carácter de intrusividad. Los trabajos de Lindberg y Backteman (1988) muestran que la baja frecuencia contribuye a:

1. Sensación de presión el oído externo. Efecto similar a conducir un vehículo con ventana abierta.
2. Efectos de enmascaramiento temporal sobre las medias y altas frecuencias que dificulta la conversación. La conversación es una señal fuertemente modulada en amplitud y puede verse afectada por los llamados patrones de enmascaramiento temporal.
3. Sensación de percepción de vibraciones en algunos enseres de la casa. (mesita de noche, lámpara, etc.)

Berglund y Lindvall (1995) añaden otros efectos:

1. Deterioro de la calidad de las tareas realizadas.
2. Reducción del descanso reparador.
3. Interferencia con el sueño, dolor de cabeza, irritabilidad.

La experiencia muestra que el nivel sonoro de un ruido de baja frecuencia no tiene porqué ser elevado para generar molestia. Cuando la fuente de ruido es externa, cerrar las puertas o las ventanas de la sala, no mejora la situación, más bien la empeora, enfatizándose más aún la percepción de la baja frecuencia. Algunos trabajos (Krahé 2010) muestran que la molestia del ruido de baja frecuencia disminuye cuando hay energía a frecuencias altas. Con las ventanas abiertas, el ruido exterior de frecuencias altas, puede entrar libremente haciendo que la percepción de las bajas frecuencias disminuya. La percepción auditiva empieza estadísticamente a los 20 Hz. Pueden darse casos de sensibilidad auditiva por debajo de los 20 Hz. Aunque esto se podría considerar en principio como un caso atípico, lo cierto es que es más habitual de lo que parece. La percepción tàctil del sonido se encuentra sólo a unos 20-25 dB por debajo del umbral auditivo. (Landstrom et Al. 1983). La característica del sonido cambia a medida que nos acercamos a los 20 Hz. El sonido pasa de ser continuo a ser pulsado, es decir, desaparece la tonalidad del sonido. Esta percepción de los períodos es lo que los afectados manifiestan como “se percibe como una presión en el interior del oído”. (Moller & Pedersen 2004). Este fenómeno varía de una persona a otra.

## 5. MOLESTIA GENERADA.

La molestia generada sobre un individuo, depende por un lado de las características acústicas del ruido, y de otro de las particularidades culturales y sociales de la persona. (Guski 1999). En el caso concreto de la baja frecuencia, algunos de los descriptores más usados son:

a. Desagradable. Los trabajos de Inurai et Al. (2000) establecen una escala de desagrabilidad del sonido por la presencia de baja frecuencia. Este trabajo muestra que un sonido de baja frecuencia no resulta molesto por el hecho de ser audible.
b. Balance espectral. El balance energético entre las bajas, medias y altas frecuencias, describe el carácter molesto de un ruido. (Bryan 1976, Blazier 1981, Barti 2000).
c. Diferencia dB(C) – dB(A). Los trabajos de Broner 1979, Kjellberg et Al 1997, muestran que la diferencia de dB, es un indicador del contenido de baja frecuencia. Si la diferencia

supera los 20 dB, es un indicativo de percepción de baja frecuencia. No obstante para niveles bajos de ruido, este indicador no es válido.

d. Diferencia dB(LIN) – dB(A). Este indicador fue investigado por Cocchi et Al. 1992. Correlaciona bien para bajos niveles sonoros.
e. Variaciones de nivel. Distintos trabajos muestran que las fluctuaciones del nivel sonoro, incrementan la sensación de molestia. (Bradley 1994, Barti 1995, Leventhall 2003).

Este último indicador es el que se ha utilizado en este trabajo por ser sencillo y fácil de aplicar, que no requiere hacer cálculos o conversiones complejas.

## 6. SONORIDAD.

La sonoridad de un ruido tiene en cuenta el nivel y la frecuencia y las curvas de igual sonoridad muestran la sensibilidad auditiva para diferentes niveles de intensidad acústica. La sonoridad es lo más cercano a la percepción del sonido. Los niveles expresados en dB(A) quedan muy lejos de la sensación percibida para niveles moderados de intensidad. Existen dos métodos estandarizados por ISO para medir la sonoridad: ISO 532 A llamado método de Stevens, y la ISO 532 B llamado método de Zwicker. Esta norma cambia de métodos y pasará a ser ISO 532-1 método de Zwicker, y ISO 532-2 método de Moore/Glasberg. Para el cálculo de sonoridad en este trabajo se parte del método de Zwicker, por dos motivos: el primero es para aprovechar todos los cálculos realizados con distintos casos desde hace 5 años hasta la fecha. El segundo porque el método de Zwicker está en este momento normalizado como método para evaluar la sonoridad de un ruido. Con el método de Zwicker se obtiene la sonoridad a partir del espectro en tercios de octava de 25 Hz a 12,5 KHz. El método de cálculo se basa en un programa en Basic elaborado por Kuwano y Namba (1984). Este programa se adapta a Matlab para su implementación.

## 7. CASOS ANALIZADOS. MUESTREO.

Los casos considerados corresponden a personas que se ven afectadas por la presencia de baja frecuencia en sus domicilios. Se han analizado un total de 79 casos distintos. En la gran mayoría las personas afectadas indican el punto donde se produce la molestia, que suele ser en el dormitorio. La fuente de ruido principal son actividades relacionadas principalmente con el ocio nocturno. En la mayoría de casos existe una actividad en los bajos del edificio o en las inmediaciones, y la vivienda afectada es el primer o segundo piso. Todas las mediciones se han realizado con la presencia del técnico en el punto de medida, y con las ventanas y accesos cerrados en caso de las mediciones en ambiente interior, y en la fachada, en ambiente exterior. De los 79 casos, 61 son en ambiente interior y 18 en ambiente exterior.

Respecto a la distribución espectral de los niveles de inmisión se puede observar como la energía de baja frecuencia se centra principalmente entre 40 Hz y 160 Hz para las actividades interiores y entre los 20 Hz y los 125 Hz para las actividades exteriores.

## 8. COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES ACTUALES.

Los métodos que aparecen referenciados en el RD1367 y en el D176, se comparan inicialmente con las dos nuevas funciones que se pretenden aplicar al nuevo método, basadas en el desnivel sonoro por un lado, y en la sonoridad por otro. Los 79 casos analizados en este trabajo se dividen en tres bloques, en función de la percepción subjetiva. La valoración subjetiva es poco fiable en cuanto a valorar cantidades. No obstante, y a pesar del carácter subjetivo, puede resultar más fácil detectar la presencia o no de componentes de BF.

Los resultados muestran que los dos indicadores coinciden en el 45,6 % de los casos. Sin embargo lo más preocupante desde el punto de vista técnico, es la evaluación opuesta. Un indicador muestra que no hay componentes de BF y el otro indicador dice que hay percepción fuerte, y viceversa. La valoración opuesta llega al 27,8 % de los casos. En el 26,65 de los casos la valoración de los dos indicadores para el mismo ruido era simplemente distinta. Con estos resultados resulta evidente que los resultados que ofrecen los métodos legislativos actuales, resultan en general bastante contradictorios entre ellos lo que supone un demérito para la credibilidad de la ingeniería ante la sociedad.

## 9. DESCRIPCIÓN DEL NUEVO MÉTODO.

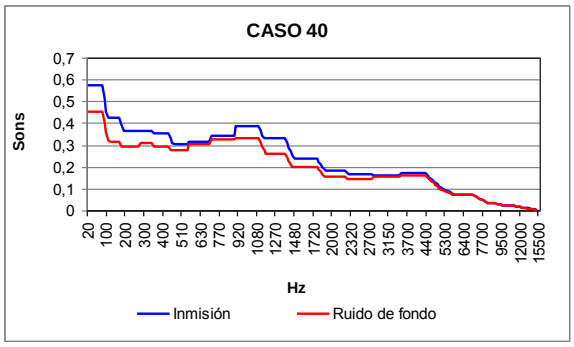
Como se ha comentado antes, la percepción de la baja frecuencia tiene una gran variabilidad con las personas y sobre todo del punto de medida en espacios interiores. Fijando estos puntos donde los afectados manifiestan que perciben estos sonidos, sólo queda por definir la forma de evaluar el grado de molestia percibido. Los datos de partida deben ser compatibles con los equipos de medida actuales. Por ello lo más razonable es aprovechar la información proporcionada por los análisis de frecuencia en tercios de octava. El margen de las bajas frecuencias, a tenor de los niveles registrados, se establece de 20 Hz hasta los 200 Hz, coincidiendo con la mayoría de métodos de medida expuestos anteriormente.

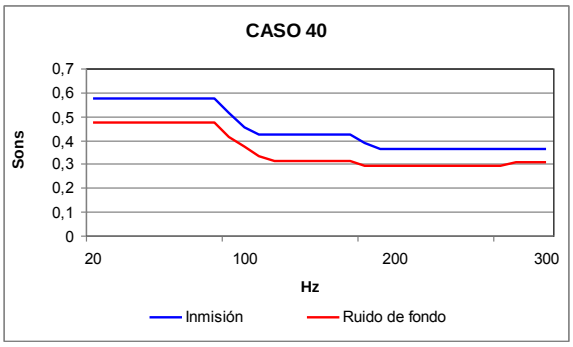
El nuevo método se basa en el cálculo de dos elementos distintos. Por un lado se parte de la sonoridad de las dos primeras bandas críticas, hasta los 200 Hz, y por otro lado, se tiene en cuenta los desniveles relativos de la inmisión respecto del ruido de fondo en cada caso, en lugar de partir de valores absolutos. Con esta estrategia de partida se realiza un análisis de regresión lineal múltiple usando como variables independientes, la sonoridad de la inmisión y del ruido de fondo de las dos primeras bandas críticas (hasta 200 Hz). Tras este proceso, se recurre a una sectorización y normalización de los valores obtenidos en base al escalado discreto actual de 0 - 3 - 6 dB. La fórmula final obtenida se muestra seguidamente:

$$NM = Son_{Inm} - 2{,}05 \cdot Son_{rf}$$

Escalado:
Para NM ≤ 0,05 entonces NM = 0
Para 0,05 < NM ≤ 0,3 entonces NM = 3
Para 0,3 < NM entonces NM = 6

El gráfico siguiente muestra un ejemplo del cálculo de la sonoridad mediante el método de Zwicker, para el caso 40. A la izquierda se muestra el análisis completo para las 24 bandas críticas. El cálculo se hace a partir del espectro en 1/3 de octava de 25 Hz a 12,5 KHz. A la derecha se muestra un zoom de las dos primeras bandas seleccionadas para el cálculo de las componentes de baja frecuencia, de 20 Hz a 200 Hz.



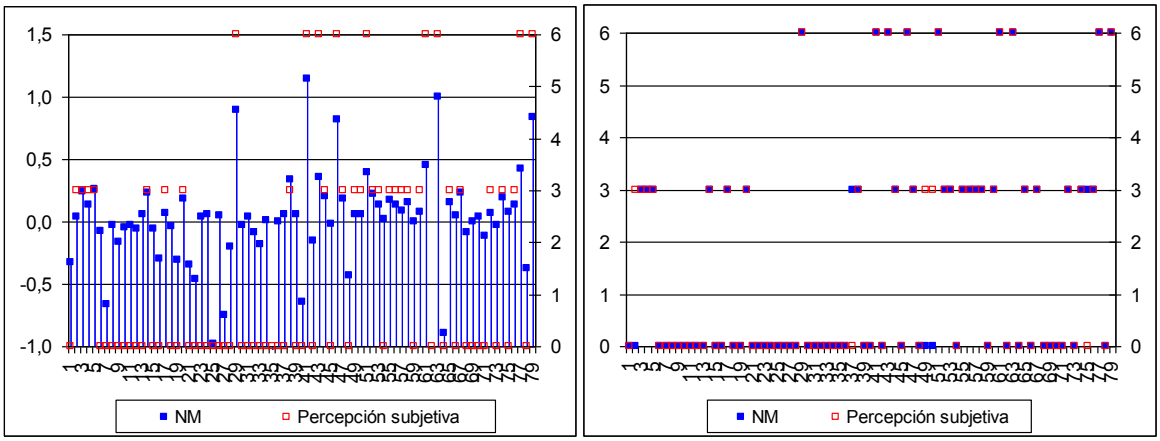

## 10. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS.

A los 79 casos se les aplica los distintos métodos para evaluar la presencia de componentes de BF, y se comparan con la percepción subjetiva. Las valoraciones más precisas se producen cuando no hay percepción de baja frecuencia, y cuando la percepción es fuerte. Obviamente, la sensación que un sonido produce sobre una persona, puede diferir de otras, por lo que las valoraciones subjetivas, solo son un indicador de la tendencia. Notamos que se han descartado muchos otros casos donde la valoración subjetiva no se hizo, o bien ésta era poco fiable. Por la limitación de extensión de la comunicación sólo se presentan los resultados obtenidos por el nuevo método propuesto.

### 10.3. Valoración de la BF según NM.

Se aplica la metodología del NM descrita anteriormente, a los 79 casos. El gráfico siguiente muestra los resultados obtenidos para los 79 casos analizados. A la izquierda se muestra el

resultado de la evaluación, y a la derecha el resultado una vez aplicado el escalado o segmentación de 0 - 3 – 6 dB.




Después del escalado (gráfica derecha) podemos observar como la mayoría de casos el indicador NM coincide con la percepción subjetiva propuesta. Las tabla siguiente muestra el porcentaje de acierto, para los tres métodos expuestos.

| PORCENTAJE DE ACIERTO | |
|---|---|
| RD 1367/2007 | 0,304 |
| D176/2009 | 0,468 |
| Nuevo método | 0,937 |

Podemos observar como el porcentaje del nuevo método propuesto, es notablemente superior a dos de los indicadores actuales.

**11. CONCLUSIONES.**

Los resultados obtenidos, evidencian que se pueden desarrollar métodos para la evaluación de la BF, que aún siendo muy sencillos como el expuesto en este trabajo, son mucho más eficaces que los actuales.

El banco de muestras con 79 casos, no se puede considerar en ningún caso suficiente, si bien da una muestra bastante significativa de la tendencia y de los resultados que se pueden obtener. La implementación de éste método es muy sencilla, ya que se parte de los datos del espectro en 1/3 de octava que cualquier equipo de medida, puede obtener en estos momentos. El cálculo posterior, es también muy sencillo, y podría implementarse sin problemas en el “soft” del equipo de medida. Nótese que las mediciones nunca pueden pretender dar valores instantáneos, por lo que dedicar unas fracciones de segundo para realizar los cálculos no supone ningún problema. El método expuesto no es infalible, y sería necesario aplicarlo a muchos más casos, donde se disponga de una información sobre la sensación subjetiva, para establecer comparaciones.

La ausencia o presencia fuerte de componentes de BF, es relativamente fácil de apreciar en un sonido, aunque el concepto “fuerte” es difícil de fijar de forma unívoca. Sin embargo entre ambos estados, se hace muy difícil establecer un escalado subjetivo fiable. En muchos casos el concepto de “percepción neta”, tiene diferentes interpretaciones en función del lugar donde se produce el fenómeno y de la impresión subjetiva de la persona.

El escalado de 0-3-6 dB, produce resultados en que en muchas ocasiones se penaliza o no por una décima de decibelio, generando como mínimo dudas respecto del resultado. Parecería más razonable un escalado progresivo de la aplicación de las penalizaciones. Aunque este punto parece bastante evidente y claro desde el punto de vista de la ingeniería, no lo es desde el punto de vista del legislador, quien ve en este cambio una modificación importante. Según el legislador,

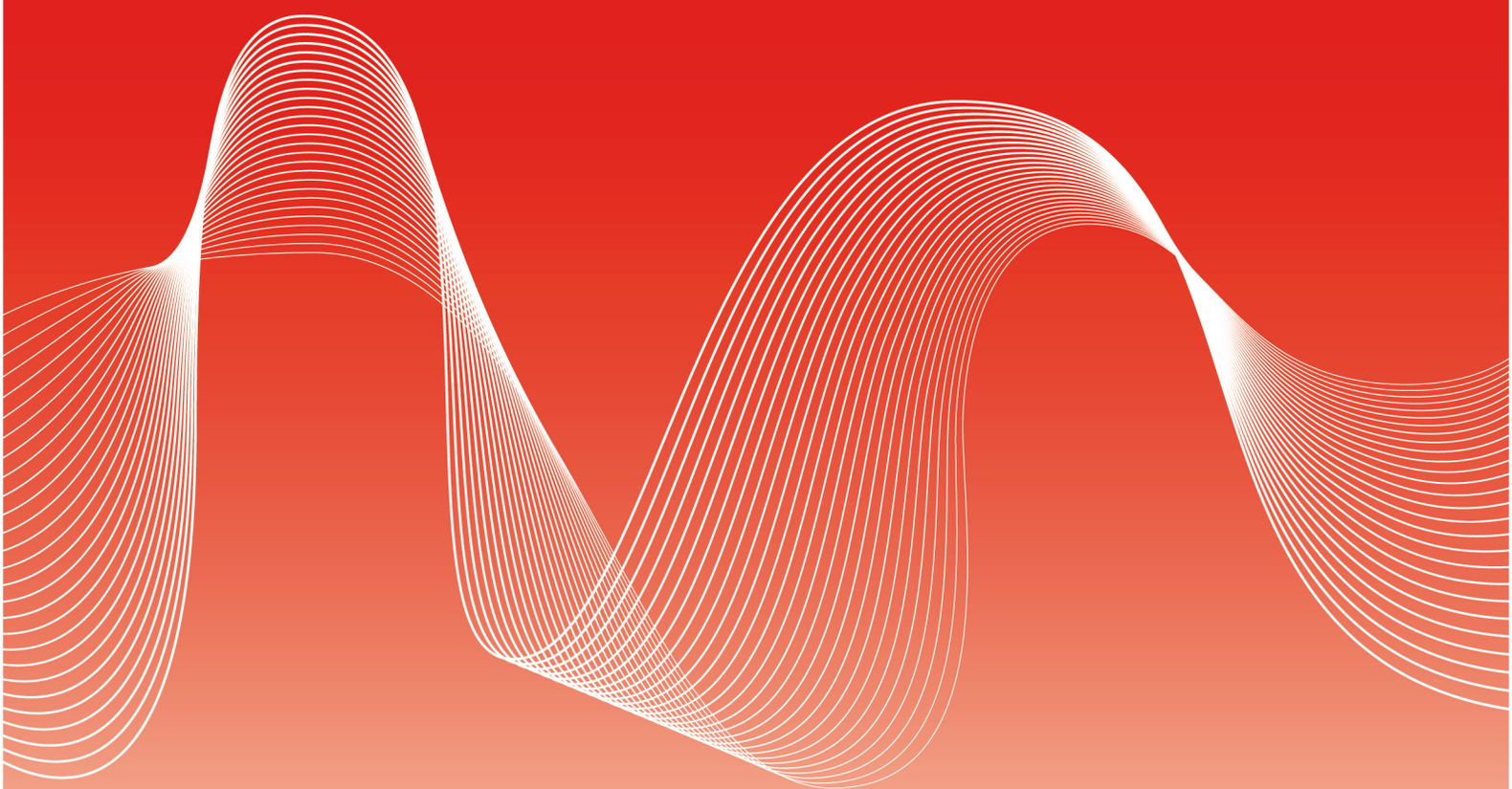
un cambio como el propuesto no puede ser aplicado ya que afecta al redactado de la Ley, por lo que se requiere una revisión o modificación del texto legislativo. Realmente lo más simple sería modificar el anexo técnico. Otro aspecto que entra en conflicto a nivel legislativo, es un cambio de los valores máximos permitidos. Dichos valores obviamente dependen del indicador utilizado. El desconocimiento de los aspectos técnico del legislador deberían poder ser suplidos por personal competente en la materia. Los aspectos legislativos no deberían impedir o dificultar la actualización y revisión de los procedimientos técnicos para evaluar el sonido. Debería prevalecer el interés en hacer una evaluación lo más cercana posible a la percepción humana respecto a mantener los textos legislativos publicados.

**12. BIBLIOGRAFIA.**


- Alec N. Salt, Jeffery T. Lichtenhan. *Perception-based perception from low frequency sounds may not be enough.* Internoise 2012.
- Barti R. *Perceived traffic noise. LS index. International results.* Internoise 2000. Nice (2000).
- Barti R. *Problemas auditivos en la gente joven.* Tecniacústica'99. Avila (1999).
- Barti R. *Ruido de tráfico en la ciudad. Propuesta de nueva normativa.* Tecniacústica 95. La coruña (1995).
- Berglund B., Lindvall T. *Community Noise* (1995)
- Guski R. et Al., *The concept of noise annoyance:* How international experts see it. JSV 223 (1999).
- Guski R., *Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance.* Noise and Health. (1999).
- Krahé D. *Low frequency noise. Strain on the brain.* 14th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control. Aalborg 2010.
- Krahé D. *Why is sharp-limited low-frequency noise extremely annoying?* Acoustics. Paris 2008.
- Landstrom U., Lundstrom R., Bystrom M., *Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness*, J. Low Freq. Noise and Vib., Vol. 2(1). (1983).
- Leventhall G. *A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects.* DEFRA report (2003).
- Moller H., Pedersen S., *Hearing at low and infrasonic frequencies.* Noise & Health 2004 Vol 6.
- Namba S., Kuwano S. *Phsychological study on Leq as a measure of loudness of various kinds of noises.* JASJ (1984)
- Pedersen S. et Al., *Indoor measurements of noise at low frequencies. Problems and solutions.* Journal Low Frequency Noise, Vibration and Active control. Vol 26 nº4 (2007).
- Persson et Al, *Loudness, annoyance and the dBA in evaluating low frequency sounds.* Journal of Low frequency Noise and Vibration, Vol 9 (1990).
- Simmons C., *Measurements of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions.* SP REPORT 1997:27.

# Audiotec

## Ingeniería y Control del Ruido



## Calidad, Innovación, Confianza, Garantía

**LABORATORIO ACÚSTICO ACREDITADO (ENAC) | ENSAYOS ACÚSTICOS "IN SITU"**
**MEDICIONES E INFORMES ACÚSTICOS | PROYECTOS ACÚSTICOS EN LA EDIFICACIÓN**
**INSONORIZACIÓN EN EL ÁMBITO DE LA INDUSTRIA | REALIZACIÓN DE MAPAS DE RUIDO**
**INSTALACIÓN DE BARRERAS ACÚSTICAS | ELECTROACÚSTICA. LIMITADORES DE SONIDO**
**AUDITORÍAS ACÚSTICAS PARA ACTIVIDADES CLASIFICADAS. REGISTRO 32 / ECMCA**

# www.audiotec.es

**Contacto:**

Audiotec
902 373 799
info@audiotec.es

**Audiotec en España:**



**Certificaciones:**

LLOYD'S REGISTER QUALITY ASSURANCE · ISO9001 · LLOYD'S REGISTER QUALITY ASSURANCE · ISO14001 · efr pyme certificado en conciliación e igualdad 2010/02-2008 / CERTIF

**Acreditaciones:**

ENAC
ENSAYOS
Nº149/LE367

**Síguenos:**

**MIDE EL RUIDO descárgate nuestra APP para iOS**

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# INCERTEZA DE AMOSTRAGEM NAS MEDIÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL. INFLUÊNCIA NA PRECISÃO DOS INDICADORES DE LONGA DURAÇÃO, QUANDO OBTIDOS A PARTIR DE MEDIÇÕES DE CURTA DURAÇÃO.

PACS: 43.50.Rq

Mário Mateus; João A. Dias Carrilho; Manuel C. Gameiro da Silva
ADAI, LAETA – Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Pólo II)
3030-201 Coimbra, Portugal,
Tel./fax:(351)239708580/89.
E-mail: mario.mateus@adai.pt, joao.carrilho@dem.uc.pt, manuel.gameiro@dem.uc.pt

## ABSTRACT

A methodology based on the bootstrap method to evaluate the influence of the sampling parameters in the environmental noise measurements is presented. The method was applied to a time series of sound levels from road traffic in an urban area which has been continuously characterized by since 2009.
For each of the reference periods, the application of this method allowed to quantify the uncertainty component, depending on the number of sampling episodes and their respective duration. It proved possible to express the uncertainty component by means of a generic power function, with coefficients corresponding to each of the reference periods.
Including this component and considering only the remaining fixed components considered in the ISO / DIS 1996-2:2015 standard, the uncertainty value of the long-term indicator $U(L_{den})$ can increase 2 to 3 times.

## RESUMO

É apresentada uma metodologia baseada no método de *bootstrap*, para avaliar a influência dos parâmetros de amostragem, nas medições de ruído ambiental. O método foi aplicado a uma série temporal de níveis sonoros correspondentes a uma fonte rodoviária inserida numa zona urbana que se encontra caraterizada, continuamente, desde 2009.
Para cada um dos períodos de referência, a aplicação deste método permitiu quantificar a componente de incerteza, em função do número de episódios de amostragem e da sua respetiva duração. Verificou-se ser possível expressar esta componente de incerteza através de uma função potência, genérica, adaptando-a a cada um dos períodos de referência.
Incluída esta componente e considerando exclusivamente as restantes componentes fixas, contabilizadas na norma ISO/DIS 1996-2:2015, o valor de incerteza do indicador de longa duração $U(L_{den})$ pode aumentar entre 2 a 3 vezes.

**Palavras-chave:** Incerteza dos indicadores de ruído de longa duração; Estratégias de amostragem; Monitorização de ruído ambiente; Medição de ruído.

## INTRODUÇÃO

A versão atual da norma ISO/DIS 1996-2, preparada pelo ISO/ TC 43/ SC1 e cuja votação final está prevista para 2015/09/02 [1], propõe atualmente dois métodos distintos para estimar os indicadores de ruído de longa duração: recorrendo um a medições de longa duração; e o outro a medições de curta duração. Nos dois métodos é proposto que a amostragem seja composta por distintas campanhas de medição. A amostragem pode assim ser constituída por episódios de medição, distribuídos pelos períodos de referência em avaliação. Embora a norma proponha metodologia para a estimação da incerteza, dando exemplos para diversas situações, nenhum dos modelos tem em consideração a fonte de incerteza associada à estratégia de amostragem escolhida pelo técnico. Este tem a seu cargo decidir não só o momento em que deve concretizar cada episódio de medição, assim como a duração de cada episódio e o respetivo número de episódios de medição. Estes dois últimos parâmetros (duração e número de episódios de medição) podem condicionar a incerteza final e o grau de precisão com que são obtidos os indicadores de longa duração.

Relativamente a estes indicadores é possível encontrar diversa literatura [2-5] que fornece indicações relativamente à precisão possível de obter com uma estratégia de amostragem específica. Contudo a quantificação desta componente, sendo desconhecida, não é ainda contabilizada em [1].

Nesse sentido, os autores desenvolveram uma metodologia de análise sistemática para a avaliar a incerteza associada uma qualquer estratégia de amostragem [6,7], baseada em medições de níveis sonoros obtidos a partir de amostragens de curta duração, relacionando a duração e o número de episódios de medições. Na Ref. [8] os autores apresentam a aplicação deste método quantificando a influência da estratégia de amostragem na determinação da incerteza do indicador de longa duração $L_{den}$.

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A obtenção do conjunto de dados meteorológicos e de níveis sonoros, foram obtidos entre Maio de 2009 e Dezembro de 2012, numa zona urbana da cidade de Coimbra, em que a fonte dominante corresponde a uma fonte de tráfego rodoviário. Nesta zona o tráfego atravessa uma ponte sobre o rio Mondego. A Figura 1 mostra a fotografia aérea do local, obtida a partir da aplicação Google Earth. No local de medição encontra-se sobreposta a rosa-dos-ventos onde é possível verificar que a direção predominante corresponde a NW. Para esta direção a velocidade média do vento encontra-se no intervalo [1,0 m.s-1 e 2,0 m.s-1].




Figura 1 – Imagem aérea da zona estudada, com a sobreposição da rosa-dos-ventos (adaptado de Google earth)

O ponto de medição situa-se a aproximadamente 150m da via de tráfego considerada O sistema de medição é constituído com base num sistema de aquisição de dados da National Instruments, um microfone modelo 4189 e um pré amplificador modelo 2671. O microfone do sistema de medição está montado no exterior de uma janela do terceiro andar do edifício do Laboratório de Aerodinâmica Industrial, da Universidade de Coimbra [9]. A cadeia de medição cumpre as especificações da norma IEC61672-1:2002, para a classe de precisão I [10].

A Figura 2 mostra, com linha tracejada, os níveis médios horários obtidos ao longo de 4 anos de aquisição contínua e, com linha sólida, os níveis médios horários de uma amostra de 17 dias consecutivos, a amostra utilizada na implementação do método que adiante se referirá. A linha sólida representa a variação média horária de uma amostra de níveis sonoros $L_{Aeq,5min}$, adquiridos em contínuo ao longo de 17 dias. A linha tracejada corresponde á variação média horária dos níveis sonoros $L_{Aeq,30min}$, adquiridos diariamente ao longo de 4 anos. A faixa de incerteza dos níveis sonoros que representam os 4 anos de medição, é representada pelas duas linhas ponteadas, o que considerando uma distribuição Gaussiana, e utilizando um fator de cobertura igual a 2, nos permite definir um intervalo de confiança com 95% de probabilidade. Verifica-se, portanto, que os valores obtidos a partir da amostra de 17 dias são típicos da evolução temporal do nível sonoro no local.

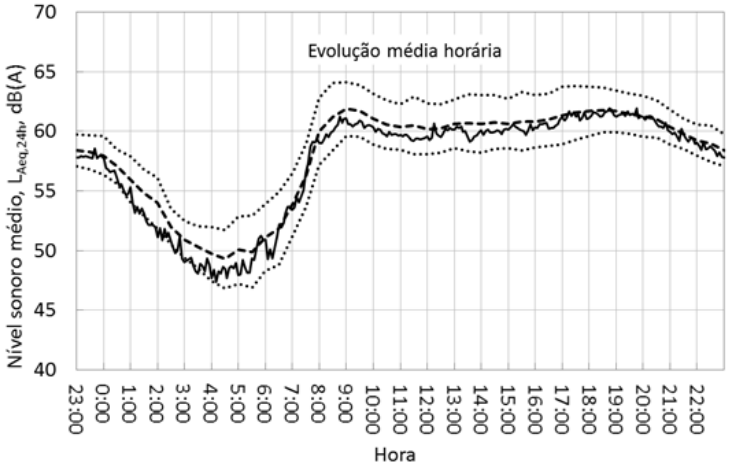



Figura 2 - Comparação entre os níveis médios obtidos ao longo de 17 dias (linha sólida) e os níveis médios obtidos durante 4 anos (linha tracejada).

## O ALGORITMO DE BOOTSTRAP

O método de *bootstap* [11] é um método de reamostragem que pode ser utilizado para estimar propriedades estatísticas de uma população completa, com base apenas numa amostra. A vantagem deste método sobre os métodos propostos em [12] assenta no fato de não ser necessário conhecer *à priori* a distribuição de probabilidade a considerar para cada uma das entradas do modelo de medição. Contudo a amostra a considerar deve ser representativa da população em estudo.

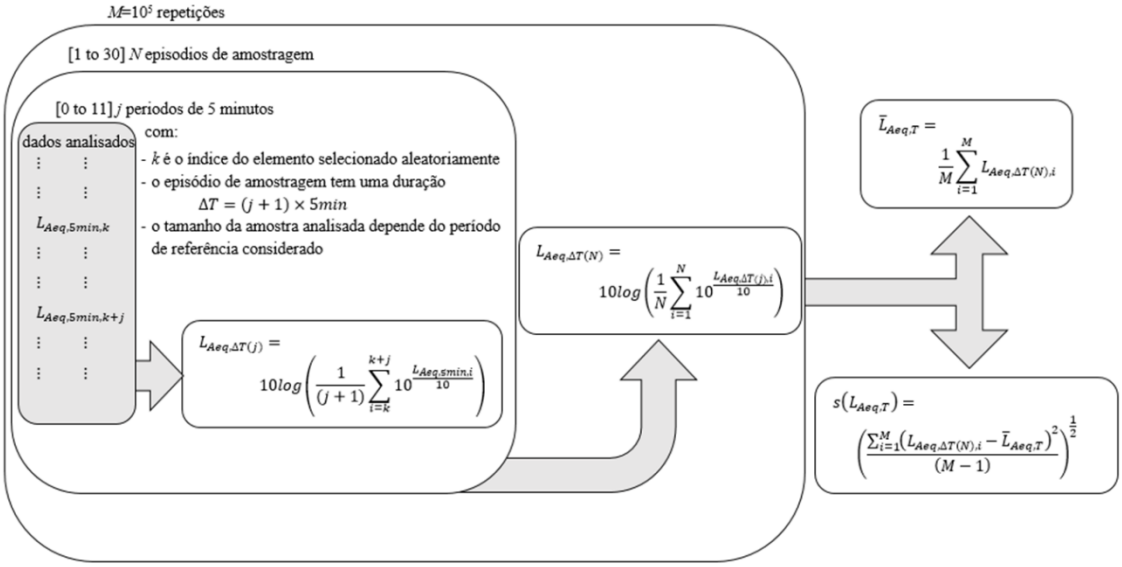
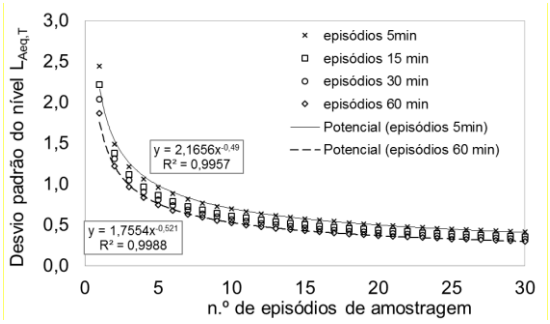


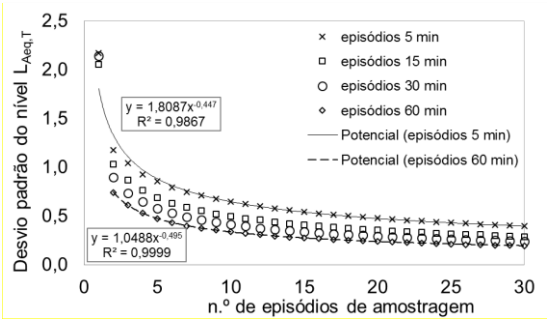

Figura 3 – Algoritmo utilizado no programa de reamostragem para obter o valor médio do desvio padrão dos níveis sonoros.

Para avaliar o efeito das diferentes estratégias de amostragem (das diferentes combinações de duração e número de episódios de amostragem), o algoritmo foi implementado sobre o *software* de desenvolvimento LabVIEW. Cada estratégia de amostragem consiste num número de $N$ episódios de medição e de duração $\Delta T$. É selecionada aleatoriamente uma amostra caraterizada por uma duração $\Delta T$, entre 5 min e 60 min, e fazendo variar o número de episódios, $N$, entre 1 e 30, obtém-se o nível sonoro $L_{Aeq,\Delta T(N)}$ correspondente. Cada combinação $(\Delta T; N)$ é calculada $M = 10^5$ vezes. Este valor foi determinado tendo em conta o critério de estabilização escolhido $\left(s(L_{Aeq,T}) = 0{,}01\ dB\right)$ [6].

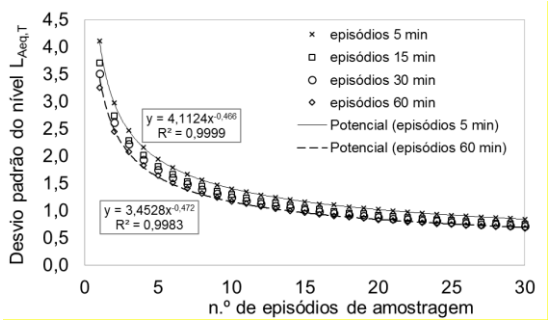
A aplicação do algoritmo representado na Figura 3 a cada um dos períodos de referência da amostra permitiu obter uma família de curvas das quais, para facilidade de leitura e representação, apenas se apresentam nas Figuras 4 a), b) e c) alguns dos resultados retirados de todas as combinações possíveis $(\Delta T; N)$. O ajustamento de curvas sobre os dados resultantes do processo de reamostragem permitiu obter as expressões polinomiais nelas incluídas. Estas expressões polinomiais, para as quais se apresenta também o quadrado dos respetivos coeficientes de correlação, são expressões do tipo $y = Ax^{-B}$. A análise daquelas figuras evidencia a existência de uma dependência com a duração de cada episódio. Foi aplicado então um novo processo de ajustamento que permitiu incluir a influência da duração de cada episódio de amostragem, ficando assim o indicador desvio padrão definido como uma função de duas variáveis: o número e a duração de cada episódio de amostragem.




(a)




(b)




(c)

Figura 4 - Desvio padrão do nível $L_{Aeq,T}$ em função do número de episódios de amostragem, em cada período de referência:
a) diurno; b) entardecer; c) noturno.

As expressões obtidas obedecem a uma estrutura formal, na qual variam somente os coeficientes numéricos, em função do período de referência considerado [6, 7], vindo:

$$s = c_1 \times \Delta T^{\alpha_1} \times N^{-(\alpha_2 + \alpha_3 \times \ln(\Delta T))} \qquad (1)$$

Verificou-se então ser possível adaptar a expressão (1) a cada um dos períodos de referência, através dos coeficientes apresentados na Tabela. 1.

| Coeficiente | diurno | entardecer | noturno |
|---|---|---|---|
| $c_1$ | 2,5224 | 2,2885 | 4,6034 |
| $\alpha_1$ | -0,086 | -0,181 | -0,086 |
| $\alpha_2$ | 0,408 | 0,3695 | 0,4686 |
| $\alpha_3$ | 0,010 | 0,034 | 0,002 |

Tabela 1 – Valores numéricos dos coeficientes da Equação (1), aplicáveis a cada período de referência.

Após a adaptação a cada um dos períodos de referência [13], a expressão (1) permite determinar o valor da componente de incerteza associado a uma estratégia de amostragem cujos parâmetros estejam dentro do domínio de validade do modelo considerado. Foram consideradas neste caso medições de curta duração [1]. Doravante esta componente passará a ser referenciada $u_{samp}$.

## INCERTEZA DO INDICADOR DE RUÍDO DE LONGA DURAÇÃO

Na Ref. [13] o indicador de ruído de longa duração é dado pela seguinte expressão (2):

$$L_{den} = 10 \times \log_{10}\left[\frac{1}{24}\left(12 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}}\right)\right] \qquad (2)$$

Os indicadores $L_d$, $L_e$, $L_n$ são os níveis sonoros de longa duração para os períodos de referência: dia, entardecer e noite. A sua obtenção pode ser efetuada a partir de medições de

curta duração [1] desde que sejam consideradas as condições meteorológicas, pois estas podem ter forte influência na propagação da energia sonora entre o emissor e o recetor. O seu efeito é incorporado uma vez que são introduzidas 4 classes meteorológicas: M1 – desfavorável; M2 – neutra; M3 – favorável; e M4 – muito favorável. Se forem efetuadas várias medições numa condição meteorológica específica, $n_{M_i}$, e para a qual seja conhecida (ou estimada) a sua probabilidade de ocorrência, $p_{M_i}$, os indicadores de cada período de referência podem ser estimados por

$$L_{[d],[e],[n]} = 10 \times log_{10}\left(\sum_i p_{M_i,[d],[e],[n]} \times 10^{0.1 L_{M_i,[d],[e],[n]}}\right) \quad (3)$$

A incerteza combinada dos indicadores $L_d$, $L_e$, $L_n$ pode ser obtida através da aplicação da lei da propagação das incertezas, resultando

$$u\left(L_{[d],[e],[n]}\right) = \left\{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial L_{[d],[e],[n]}}{\partial L_{Mi}} \times u(L_{Mi})\right]^2 + \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial L_{[d],[e],[n]}}{\partial p_{Mi}} \times u(p_{Mi})\right]^2\right\}^{1/2} \quad (4)$$

Assumindo a independência entre as diversas variáveis envolvidas, tal como é assumido em [1], a aplicação da metodologia expressa no GUM [12], e incluindo também agora a componente $u_{samp}$, permite-nos obter a expressão para a incerteza do indicador $L_{den}$:

$$u(L_{den}) = \left\{\left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d}\right)^2\left[u^2(L_d) + u^2_{samp,d}\right] + \left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e}\right)^2\left[u^2(L_e) + u^2_{samp,e}\right] + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n}\right)^2\left[u^2(L_n) + u^2_{samp,n}\right] + u^2_{loc} + u^2_{slm}\right\}^{1/2} \quad (5)$$

onde:

- $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d}$, $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e}$ e $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n}$ são os coeficientes de sensibilidade, isto é, expressão da variação que ocorre em $L_{den}$, respetivamente, devido a variações em $L_d$, $L_e$ e $L_n$;
- $u(L_d)$, $u(L_e)$ e $u(L_n)$ correspondem à incerteza padrão associada às medições efetuadas para caraterizar o nível sonoro em cada um dos períodos de referência;
- $u_{loc}$ é a incerteza padrão associada com a localização do ponto de medição;
- $u_{slm}$ é a incerteza padrão associada à cadeia de medição;
- $u_{samp}$ é a incerteza padrão associada com o processo de amostragem em cada período.

A equação (5) assume que as componentes de incerteza associadas ao equipamento de medição e à localização do microfone são constantes, ou seja, as medições são sempre efetuadas com o mesmo equipamento e o microfone é colocado sempre no mesmo local. Já a componente $u_{samp}$ poderá variar dependendo da estratégia adotada em cada período.

Os coeficientes de sensibilidade são representados pela expressão (6), onde $w$ é 0 dB, 5 dB ou 10 dB, respetivamente, para os períodos do dia, entardecer e noite.

$$\frac{\partial L_{den}}{\partial L_i} = \frac{t_i 10^{0.1(L_i+w)}}{12\times10^{0.1(L_d)}+4\times10^{0.1(L_e+5)}+8\times10^{0.1(L_n+10)}} \quad (6)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Ref [1] os valores das componentes fixas associadas ao equipamento de medição e à localização do microfone, são respetivamente, 0,5 dB e 0,4 dB. O valor indicado para esta última componente é válido desde que o ruído seja proveniente de tráfego rodoviário, com uma incidência não rasante, relativamente à superfície onde o microfone se encontra colocado. Considerando apenas estas duas componentes fixas, e considerando as restantes componente incluídas em (5) nulas, a incerteza expandida $U(L_{den})$ não será inferior a 1,3 dB.

De acordo com o modelo assumido neste trabalho, a componente $u_{samp}$ é sempre afetada pelos coeficientes de sensibilidade associados a cada período. Verifica-se que os coeficientes têm uma forte dependência com os níveis sonoros em cada período (ver Tabela 2).

| Caso | $L_d$ (dB(A)) | $L_e$ (dB(A)) | $L_n$ (dB(A)) | $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d}$ | $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e}$ | $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 61 | 60 | 50 | 0,423 | 0,354 | 0,224 |
| B | 61 | 60 | 54 | 0,316 | 0,264 | 0,420 |
| C | 61 | 60 | 58 | 0,193 | 0,162 | 0,645 |

Tabla 2. - Níveis sonoros para três situações diferentes, e seus respetivos coeficientes de sensibilidade, para análise da influência da amostragem na incerteza expandida $U(L_{den})$.

A inclusão da componente $u_{samp}$, nos três casos considerados, cujos resultados se apresentam nas Figuras 5 a), b) e c), evidencia a influência da componente de amostragem na incerteza expandida $U(L_{den})$. É também realçada a sua dependência com o número e a duração de cada episódio, assim como com as diferenças entre os níveis dos indicadores $L_d$, $L_e$ e $L_n$.

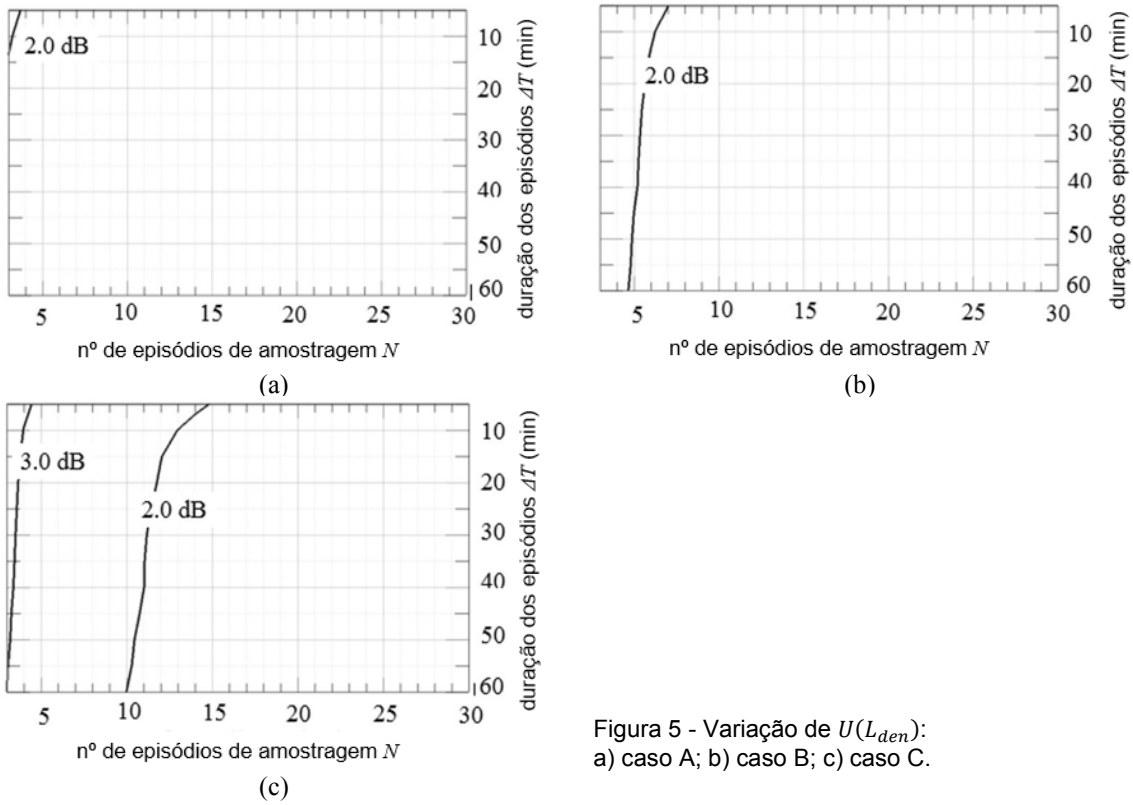



Figura 5 - Variação de $U(L_{den})$:
a) caso A; b) caso B; c) caso C.

A influência que o nível sonoro no período noturno tem sobre os resultados apresentados para a incerteza expandida $U(L_{den})$ é tanto maior quanto menor for a diferença entre os níveis nos restantes períodos. Este fato resulta do peso que é dado pelo respetivo coeficiente de sensibilidade e também devido à incerteza da amostragem do nível de ruído nesse período.

Os resultados apresentados nestas figuras referem-se apenas às componentes fixas, não contêm ainda o valor da incerteza inerente à repetibilidade das medições o que naturalmente deverá aumentar os limites apresentados.

## CONCLUSÃO

Para avaliar a qualidade das estratégias de amostragem que permitam estimar os indicadores de ruído ambiental de longa duração, num determinado local, os autores propuseram um método de análise sistemática, baseado no método de *bootstrap*.

Esta metodologia permite determinar a melhor estratégia de amostragem que garanta um dado nível de precisão. Implicitamente ficou também demonstrado que se pode ajustar o esforço a colocar nas medições tendo em conta a contribuição que cada componente tem sobre o resultado final, bem como a precisão que se lhe queira atribuir.

## REFERÊNCIAS

[1] ISO/DIS 1996-2:2015, Acoustics – description, measurement and assessment of environmental noise - Parte 2: determination of environmental noise levels; 2015.

[2] Gaja E., Gimenez A., Sancho S., Reih A. Sampling Techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions, Applied Acoustics 2003; 64(1); 45-53.

[3] Kuehne D. Long-term Leq Errors Expected and how long to Measure (Uncertainty and Noise Monitoring), ForumAcusticum 2005, Budapest (Hungary), Aug 29 - Sep 2; 2005.

[4] Brambilla G., Lo Castro F., Andrea C., Verardi P. Accuracy of temporal samplings of environmental noise to estimate the long-term Lden value, Internoise 2007, Istanbul (Turkey), August 28-31; 2007.

[5] Jagniatinskis A., Fiks B. Assessment of environmental noise from long-term window microphone measurements, Applied Acoustics 2014; 76; 377-385.

[6] Mateus, M. 2014. The influence of the sampling parameters on the uncertainty in environmental noise measurements, University of Coimbra, 2014, PhD Thesis in Portuguese, ISBN 978-972-8954-39-0.

[7] Mateus M, Dias Carrilho J and Gameiro da Silva M. Assessing the influence of the sampling strategy on the uncertainty of environmental noise measurements through Bootstrap method. Applied Acoustics 2015; 89; 159-165. doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.021.

[8] M. Mateus; J Dias Carrilho; M. C. Gameiro da Silva. Influence of short-term sampling parameters on the uncertainty of de Lden environmental noise indicator. In: IMEKO JOINT - SYMPOSIUM 2014, 2014. Funchal – Madeira. In Proceedings Book - IMEKO Joint - Symposium 2014 TC1+TC7+TC13. IOP Conference Series, 2014. doi:10.1088/1742-6596/588/1/012026.

[9] Mateus, Mário; Dias Carrilho, João; Gameiro da Silva, Manuel. 2015. An experimental analysis of the correction factors adopted on environmental noise measurements performed with window-mounted microphones. Applied Acoustics, 2015; 87, p. 212-218, 2015. doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.021.

[10] IEC 61672-1:2002, Electroacoustics: Sound level meters. Part 1: Specifications; IEC; 2002.

[11] Efron B. Better Bootstrap Confidence Intervals, Journal of the American Statistical Association 1987; 82;171-185.

[12] JCGM 100, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, Paris: Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.

[13] Directive 2002/49/EC, of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise; 2002.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# PROPUESTAS DE PROCEDIMIENTOS PARA LA MEJORA DEL ANÁLISIS TEMPORAL DE PARÁMETROS ACÚSTICOS APLICADOS AL RUIDO DE TRÁFICO

PACS: 43.50.Rq

Ezpeleta Bielsa, Enrique; Navarro Ruiz, Juan Miguel
Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Campus de los Jerónimos
30107 Guadalupe, Murcia. España
Tel. +34 968 278 825
Fax. 968 278 581
E-mail: ejezpeleta@alu.ucam.com, jmnavarro@pdi.ucam.edu

## ABSTRACT

Today the characterization and evaluation of ambient noise of traffic typical lack of stability is performed with a few measurements. In the case of the regulation of Valencia suffice 9 time slot measurements.
The purpose of this research is to propose three alternative methods of data analysis evaluating the most efficient. To do this, it is part of a data through networks of acoustic traffic noise continuously for 24 hours wireless sensors.
One of the proposed methods of statistical analysis reduces the sensitivity of the results to outliers without requiring any data filtering to remove non-meaningful measurements, for this reason it is concluded as recommended method analysis.

## RESUMEN

En la actualidad la caracterización y valoración de un ruido ambiental de tráfico típico con falta de estabilidad se realiza con unas pocas mediciones. En el caso de la reglamentación de la Comunidad Valenciana bastan con 9 mediciones por tramo horario.
La finalidad de este trabajo de investigación es proponer tres métodos de análisis alternativos de los datos valorando el más eficiente. Para ello, se parte de unos datos obtenidos mediante redes de sensores inalámbricas acústicas de ruido de tráfico en continuo durante 24 horas.
Uno de los métodos de análisis estadístico propuesto reduce la sensibilidad de los resultados a los valores atípicos sin requerir de ningún filtraje de datos para eliminar mediciones no significativas, por dicho motivo se concluye como método de análisis más recomendable.

## INTRODUCCIÓN

El ruido de tráfico tiene unas características concretas como son la variabilidad de los niveles de presión sonora [1, 2] o la presencia de un amplio rango de frecuencias que lo originan varias fuentes de origen [3], entre ellas el dibujo de los neumáticos [4], esto implica una alta

complejidad para caracterizar las mediciones de ruido de tráfico [5, 6]. El ruido de tráfico es uno de los más habituales en el interior de las viviendas [7], es por lo que si se dispone de un buen sistema (eficiente y fiable) de análisis de los datos de dichas mediciones se estará en mejor disposición para tomar las decisiones más adecuadas para poder corregir y prevenir las posibles molestias ocasionadas por dichos ruidos [8].
Teniendo presente dichas premisas y partiendo de unos datos obtenidos de un estudio de investigación de la Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM) [9], se dispone, además de otras variables espectrales, de unas mediciones de cinco parámetros globales tanto en el exterior como en el interior de una vivienda: Nivel de presión sonora instantáneo (SPL), Nivel sonoro Equivalente cada 10 segundos ($L_{eq}$), Nivel máximo (Pico), y para evaluar la posible molestia psicoacústica: Sensación sonora (Loudness) [10, 11] y Nitidez sonora (Sharpness) [12]. Las mediciones provienen de un sistema de red de sensores inalámbricos que graba en continuo. Se dispone de valores de todos los parámetros durante 24 horas cada 10 segundos. El desarrollo tecnológico está ayudando mucho para poder tener una modelización más fiel de la realidad.

El objetivo de este estudio es, realizar un análisis del impacto acústico del ruido de tráfico en una edificación abordando las siguientes finalidades:

- Analizar una serie de mediciones acústicas realizadas en un entorno urbano, procedentes de otro estudio de investigación previo.
- Analizar los posibles métodos de muestreo y valorar el más eficiente,
- Obtener conclusiones de los resultados obtenidos

Partiendo de unos datos de mediciones de ruido de tráfico dentro y fuera de una vivienda se analizan los mismos, por tres métodos, se estudian cinco parámetros comparando sus resultados y sacando conclusiones de la eficacia de los tres métodos.

## REQUISITOS DE LAS MEDICIONES ACÚSTICAS

Existen muchos parámetros como indicadores del nivel sonoro ambiental [13], pero uno de los índices más utilizados es el nivel de evaluación sonora ($L_E$) que consiste básicamente en el nivel equivalente ponderado A durante un tiempo T dado ($L_{Aeq,T}$) y corregido con los factores que se indique en cada legislación, en concreto para la Comunidad Valenciana:

$$L_E = L_{Aeq,T} + K_{RF} + K_{TonosPuros} + K_{imp} + K_{reflexión} \qquad (1)$$

Se toma como índice de ruido ambiental el $L_{den}$ del periodo día-tarde-noche expresado en decibelios

$$L_{den} = 10 \cdot \log \frac{1}{24}\left[12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}}\right] \; dB \qquad (2)$$

En este caso los valores $L_d$, $L_e$, $L_n$ deberían ser los valores medios de todos los periodos día, tarde y noche de un año [14]. Pero en la práctica no se suelen hacer mediciones durante un año para evaluar un nivel sonoro.

En el caso de la legislación de la Comunidad Valenciana para evaluar un ruido variable como es el caso del ruido de tráfico bastaría con realizar 3 series de mediciones, con 3 mediciones en cada serie de una duración mínima de 5 minutos, con intervalos mínimos entre cada serie de 5 minutos [15]. Es decir, un total de 9 mediciones.

Sin embargo también se indica en la misma legislación que “la duración de las mediciones dependerá de las características del ruido que se esté valorando de modo que ésta sea lo suficientemente representativa” [16].

## PLANTEAMIENTOS ANALÍTICOS DE LOS DATOS

En este estudio se presentan tres métodos o procedimientos de análisis estadístico que se describen a continuación:

Método D

- El método denominado "D" de determinista, consiste simplemente en utilizar todos los datos obtenidos de las mediciones registradas (en este estudio 8.640 medidas por parámetro).
- Es el método más usado, por no decir el único utilizado, con la salvedad de que en realidad se trabaja con muchos menos datos (9 medidas por cada uno de los tres tramos horarios o 3 medidas si no se considera variable la señal sonora).

Método F

- El método denominado "F" de filtrado, consiste en descartar algunos de los valores registrados por considerarlos erróneos o atípicos.
- Por lo tanto, sólo se usan los registros considerados válidos (en este estudio 6.807 medidas por parámetro).
- Este método requiere de un técnico experto con criterio adecuado para realizar los filtrados de los valores a eliminar.

Método E

- El método denominado "E" de estadístico, consiste en aplicar enfoques de muestreo e inferencia estadística a los valores registrados.
- Por lo tanto, se trabaja con una cantidad inferior de datos pero muy representativa (se ha trabajado con 288 medidas para cada parámetro en cada uno de los dos puntos)
- Este método requiere de muchas medidas iniciales para poder aplicar técnicas estadísticas.

## ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE DATOS

Método D

En la evolución temporal del ruido de tráfico se observa una alta variabilidad de los niveles sonoros, en la Figura 1 se muestra un ejemplo de 24 horas y un detalle de una hora.

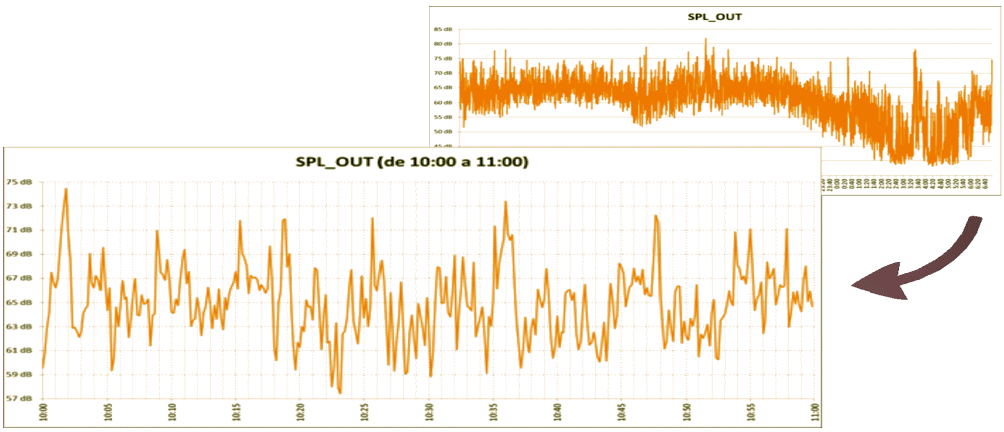



Figura 1: Evolución temporal del parámetro SPL en el exterior

En el análisis espectral es de destacar la poca correlación entre los valores estadísticos de las mediciones exteriores con respecto a las interiores.

A priori, parecería lógico esperar que a un valor pico en el interior correspondiese un valor pico en el exterior (comparar las líneas verdes de valores máximos en Figuras 2 y 3).

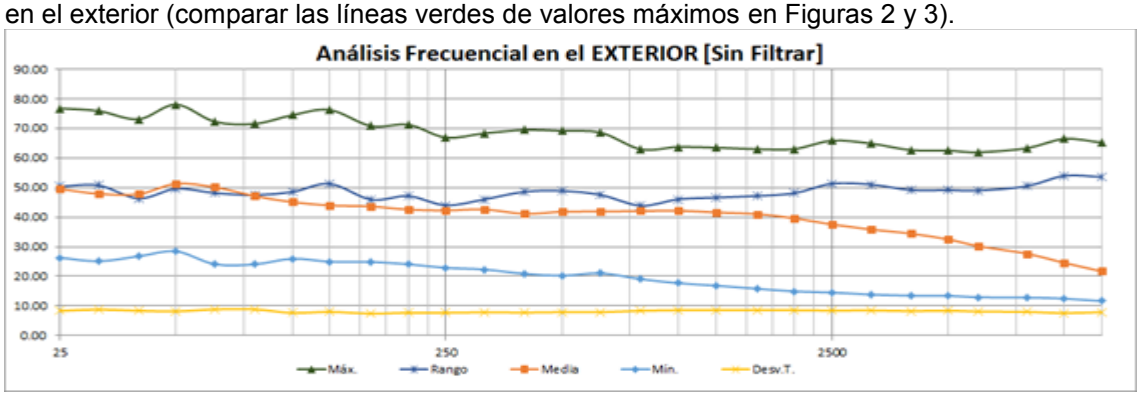



Figura 2: Parámetros estadísticos del análisis frecuencial del parámetro SPL en el exterior

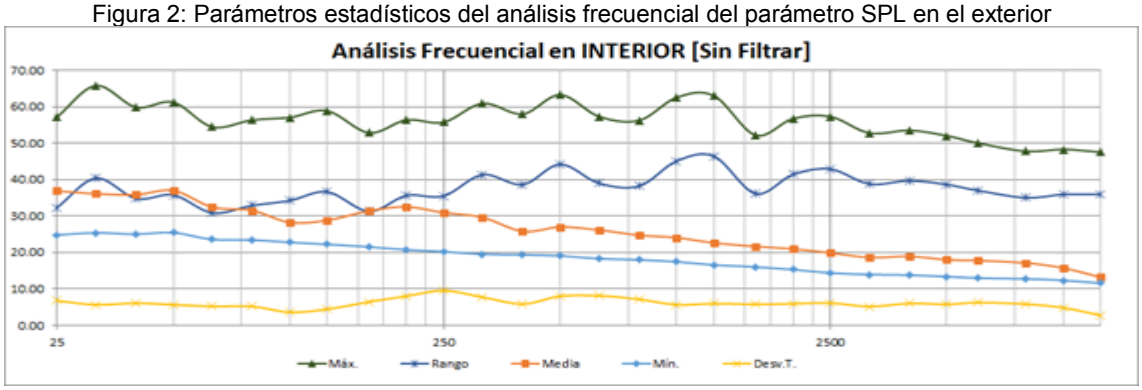



Figura 3: Parámetros estadísticos del análisis frecuencial del parámetro SPL en el interior

Método F

Para realizar un buen filtrado de datos se requiere, como ya se ha mencionado, la intervención de un técnico experto y que a ser posible haya estado presente en la toma de datos.

En este estudio, se ha considerado una medición atípica cuando su valor está fuera de 2,5 veces el rango intercuartílico, pues de esta forma se discriminan los valores extremos.

Se ha considerado una medición errónea cuando el valor en el interior supera al del exterior en 3 dB o más, ya que el ruido proviene del exterior.

Con estos criterios los datos se reducen a un 80% siendo ahora 6.807 valores válidos para cada parámetro en cada uno de los dos puntos de medida.

Si se comparan los histogramas antes y después del filtrado se aprecia una normalización de las distribuciones. Comparando las gráficas de caja antes y después del filtrado se aprecia una menor dispersión de los valores y desaparecen prácticamente los valores aberrantes, puntos que se representan fuera de los “bigotes”, (ver Figura 4).

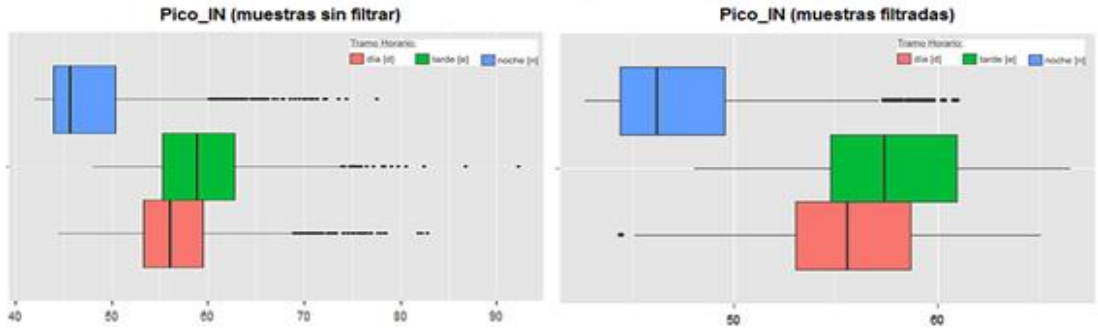



Figura 4: Comparativa de dispersiones del parámetro PICO antes y después del filtrado de datos

Después del filtrado, en el análisis espectral se observa una mejor correlación de los valores estadísticos de las mediciones exteriores con las interiores. Se aprecia una mayor coincidencia en picos y valles. (Ver la similitud entre líneas del mismo color en Figuras 5 y 6).

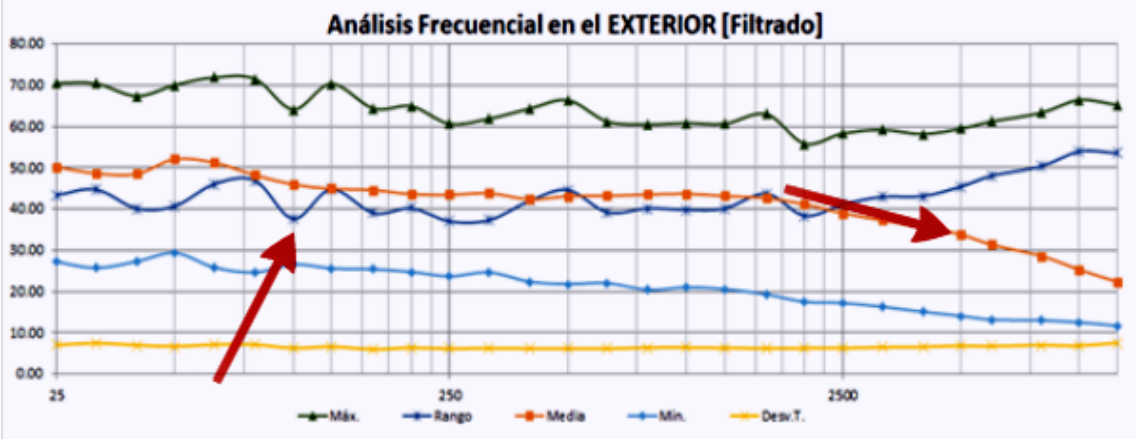



Figura 5: Parámetros estadísticos del análisis frecuencial del parámetro SPL en el exterior

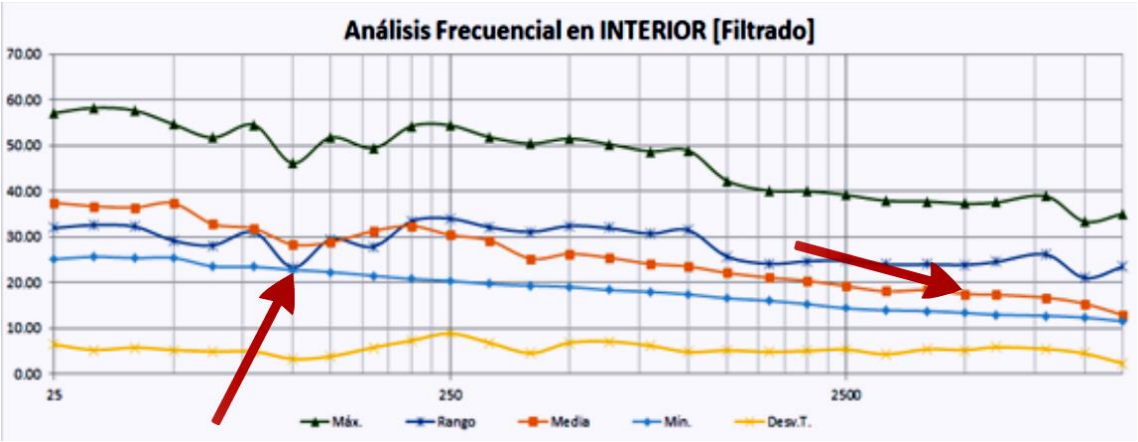



Figura 6: Parámetros estadísticos del análisis frecuencial del parámetro SPL en el interior

Método E

Al aplicar este método se asume que existe una incertidumbre en los valores medidos debido a factores distorsionantes (repetitividad, condiciones del entorno, errores en equipos de medida).

Se trata de operar con todos los valores muestreados sin eliminar ninguno, pero la variabilidad de la distribución por el posible efecto de los valores atípicos se ve reducida al tomar muchas muestras y trabajar con los valores promedio de cada una de las muestras.

Este método consiste pues de revelar el patrón de la estructura subyacente mediante la sustitución de promedios en pequeños tramos [17].

En este caso se han considerado tramos de 5 minutos, es decir cada 30 mediciones de 10 segundos, por lo tanto los datos se reducen a sólo 288 valores por parámetro y punto.

Al trabajar con valores promediados disminuye la variabilidad de los mismos siendo las series temporales mucho más claras. Ver línea azul en el gráfico adjunto

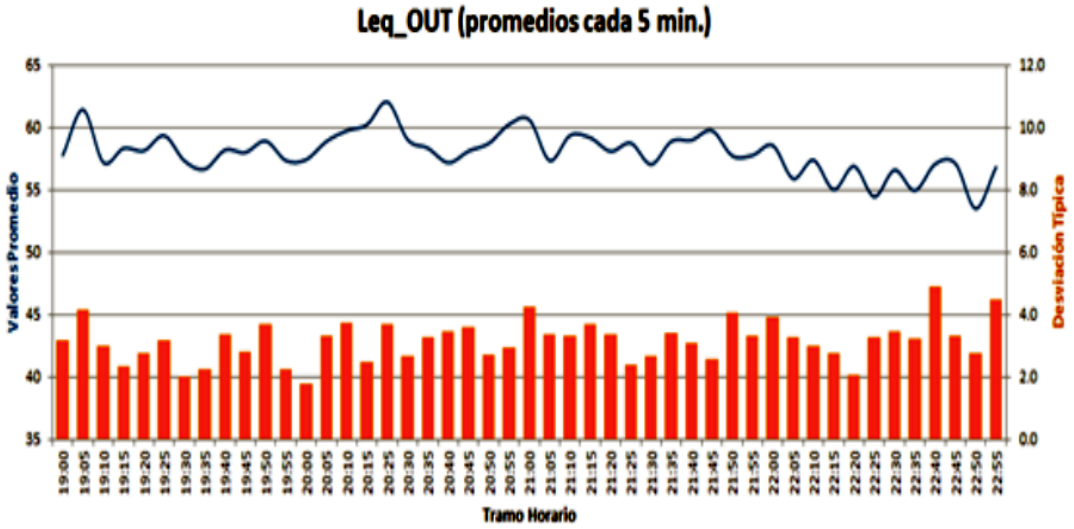



Figura 7: Evolución temporal del parámetro $L_{eq}$ en el exterior tras aplicar el análisis del método E

Al estudiar las desviaciones estándar se aprecia una disminución respecto a las desviaciones de los valores al aplicar los otros dos métodos y normalización de la distribución de las mismas (la distribución de los valores de las desviaciones se aproxima a una Normal), esto implica una mejora en la inferencia estadística, es decir, a la hora de estimar los valores reales de ruido ambiental real partiendo de los valores medidos.

## RESULTADOS

Con la finalidad de saber si es posible prescindir de algunos de los cinco parámetros medidos se ha realizado un análisis de correlación entre parámetros, para ello se ha confeccionado un gráfico con cada pareja de parámetros y se observa si existe algún tipo de correlación, en cuyo caso la nube de puntos aparecería alineada o siguiendo una función.

Se ha estudiado las combinaciones de correlación entre todos los parámetros tanto del método F (ver algún ejemplo en Figura 8) como del método E (ver algún ejemplo en Figura 9) y el resultado es que no existe ninguna relación entre ellos. Por lo tanto, no es posible prescindir de ninguno de los parámetros, incluso tras los diferentes tratamientos.

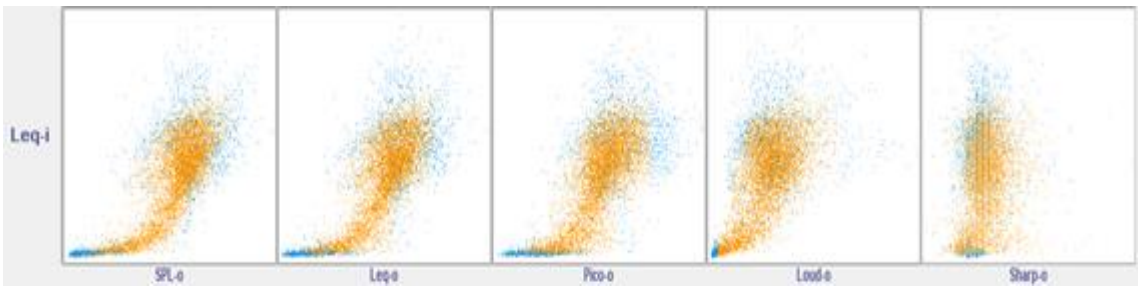



Figura 8: Relación entre $L_{eq}$ del interior y los parámetros en el exterior tras aplicar el análisis del método F

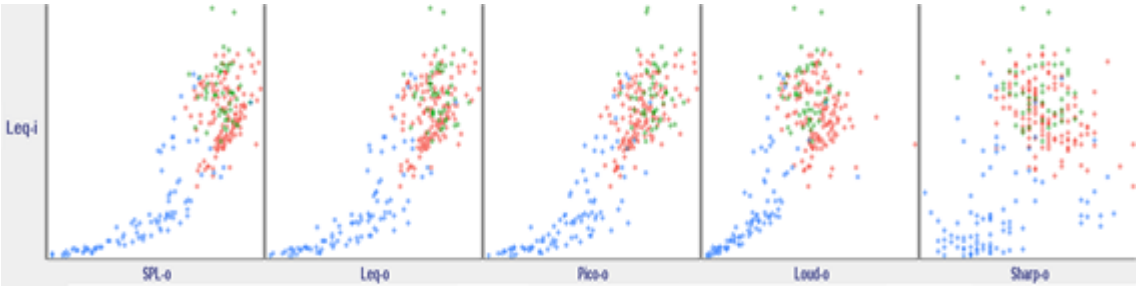



Figura 9: Relación entre $L_{eq}$ del interior y los parámetros en el exterior tras aplicar el análisis del método E

En este estudio también se ha analizado un comparativo de dispersiones: El método E es el que tiene menor dispersión en todos los parámetros, tramos horarios (d, e, n) y puntos de medida (OUT, IN). El método D es el de mayor dispersión general. Aquí se muestra el resultado del parámetro Nivel de Presión Sonora (SPL).

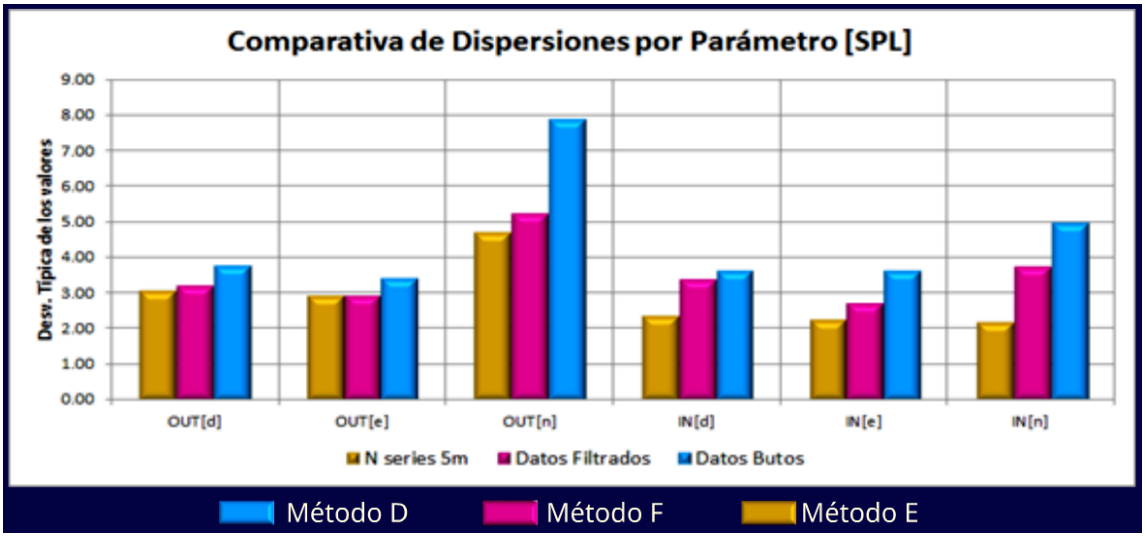



Figura 10: Dispersiones del parámetro SPL en cada tramo horario y método de análisis

Para comparar la fiabilidad de los métodos, se ha confeccionado una tabla resumiendo la variabilidad de todos los parámetros con los tres métodos y la mejora comparativa de los resultados de los métodos F y E respecto al método D. Entendiendo por mejora el porcentaje de disminución de los valores de desviación típica para cada parámetro (ver Tabla 1)

| | | Comparativa de la variabilidad de datos | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Método D Determinista | Método F FILTRADO | Método E Estadistico | Mejora Fiabilidad (Respecto a D) | |
| Parámetro | Condición | Desv.Típica | Desv.Típica | Desv.Típica | Método-F | Método-E |
| SPL | OUT[d] | 3.76 | 3.21 | 3.05 | 15% | 19% |
| SPL | OUT[e] | 3.41 | 2.91 | 2.90 | 15% | 15% |
| SPL | OUT[n] | 7.88 | 5.23 | 4.69 | 34% | 40% |
| SPL | IN[d] | 3.61 | 3.38 | 2.34 | 7% | 35% |
| SPL | IN[e] | 3.63 | 2.69 | 2.26 | 26% | 38% |
| SPL | IN[n] | 4.97 | 3.74 | 2.16 | 25% | 56% |
| Leq | OUT[d] | 3.93 | 3.26 | 3.13 | 17% | 20% |
| Leq | OUT[e] | 3.56 | 3.08 | 3.15 | 14% | 12% |
| Leq | OUT[n] | 7.01 | 4.83 | 4.26 | 31% | 39% |
| Leq | IN[d] | 3.43 | 3.18 | 2.23 | 7% | 35% |
| Leq | IN[e] | 3.32 | 2.42 | 2.18 | 27% | 35% |
| Leq | IN[n] | 4.41 | 3.26 | 1.92 | 26% | 57% |
| Pico | OUT[d] | 4.87 | 3.82 | 3.88 | 22% | 20% |
| Pico | OUT[e] | 4.54 | 3.82 | 4.08 | 16% | 10% |
| Pico | OUT[n] | 7.29 | 5.16 | 4.72 | 29% | 35% |
| Pico | IN[d] | 4.70 | 3.85 | 3.16 | 18% | 33% |
| Pico | IN[e] | 5.71 | 3.80 | 3.64 | 33% | 36% |
| Pico | IN[n] | 5.70 | 4.14 | 2.57 | 27% | 55% |
| Loudness | OUT[d] | 3.11 | 2.70 | 2.51 | 13% | 19% |
| Loudness | OUT[e] | 2.60 | 2.28 | 2.19 | 13% | 16% |
| Loudness | OUT[n] | 3.61 | 2.52 | 2.38 | 30% | 34% |
| Loudness | IN[d] | 1.64 | 1.42 | 0.61 | 13% | 63% |
| Loudness | IN[e] | 2.43 | 1.73 | 1.06 | 29% | 57% |
| Loudness | IN[n] | 1.10 | 0.77 | 0.22 | 30% | 80% |
| Sharpness | OUT[d] | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 1% | 10% |
| Sharpness | OUT[e] | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 4% | 7% |
| Sharpness | OUT[n] | 0.13 | 0.14 | 0.11 | -9% | 20% |
| Sharpness | IN[d] | 0.20 | 0.19 | 0.13 | 3% | 32% |
| Sharpness | IN[e] | 0.16 | 0.16 | 0.13 | 3% | 22% |
| Sharpness | IN[n] | 0.11 | 0.09 | 0.08 | 22% | 31% |

Tabla 1: Comparativa desviación típica de las medidas de cada parámetro al aplicar los tres métodos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado tres métodos para el análisis de los datos recopilados en mediciones de ruido de tráfico de larga duración. Usando datos reales de una medición en el interior y exterior de una vivienda durante 24h se ha realizado una comparativa de los métodos.

Tras la evaluación de los mismos, destacar los resultados mostrados por el método de análisis estadístico "E" que presenta las siguientes ventajas.

El método de análisis estadístico denominado "E" (en este estudio) es:

- Más sencillo: por no requerir de un técnico experto para llevarlo a término, pues no hay que discriminar ninguna medida y por tanto no precisa de ningún criterio para filtrar valores anormales, atípicos o erróneos.
- Más rápido: por poderse automatizar o programar sus cálculos, no es necesario revisar los valores de cada parámetro ya que se trabaja con todos.
- Más fiable: La Tabla 2 muestra el promedio de las mejoras de fiabilidad de los métodos “F” y “E” respecto al “D” para cada parámetro, lo que confirma la mayor fiabilidad del método “E” por tener menores dispersiones y por tanto proporcionar información más veraz.

| | Mejora Fiabilidad | |
|---|---|---|
| Parámetro | Método-F | Método-E |
| SPL | 20% | 34% |
| Leq | 20% | 33% |
| Pico | 24% | 32% |
| Loudness | 21% | 45% |
| Sharpness | 4% | 20% |
| MEJORA Media | 18% | 33% |

Tabla 2: Mejoras de la fiabilidad en cada método por parámetro.

## REFERENCIAS

[1] Gajardo, C. P., Gozalo, G. R., Morillas, J. B., Gómez, V., Escobar, R., Sierra, J. M., Moraga, P. A. (2014). Estructura temporal del ruido urbano y Método de Categorización. IX Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA2014, Valdivia Chile.

[2] Pedersen, T. (2007). The “Genlyd” Noise Annoyance Model: Dose-Response Relationships Modelled by Logistic Functions. DELTA Acoustics & Electronics: Hørsholm, Denmark.

[3] Soedirdjo, Hendarto, Ganesha, & Triadi. (2003). Evaluation of traffic noise in arterial road with different road roughness. Paper presented at the Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.

[4] Rathe, E., Casula, F., Hartwig, H., & Mallet, H. (1973). Survey of the exterior noise of some passenger cars. Journal of Sound and Vibration, 29(4), 483-499.

[5] Alexandre, A., Barde, J., Lamure, C., & Langdon, F. (1975). ROAD TRAFFIC NOISE Applied Science Publishers. London.

[6] Ouis, D. (2001). Annoyance from road traffic noise: a review. Journal of environmental psychology, 21(1), 101-120.

[7] Morillas, J. M. B., Gómez, R. V., Escobar, V. G., Sierra, J. A. M., Vidal, C. T., Bueno, L. A., & Martínez, J. M. V. (2002). Presentación de una encuesta para la realización de estudios sociales sobre el impacto del ruido urbano. Revista de Acústica, 33(1), 27-31.
[8] Miedema, H. M., & Vos, H. (2004). Noise annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metric day–evening–night level (DENL) and their confidence intervals. The Journal of the Acoustical Society of America, 116(1), 334-343.
[9] Ezpeleta, E., Navarro, JM. (2015) "Comparativa de procedimientos para el análisis temporal de parámetros acústicos aplicados al ruido de tráfico en la edificación". Trabajo Fin de Máster en Ingeniería ambiental de la UCAM. Julio 2015.
[10] Echarte Merino, Á. (2010). Evaluación de la calidad sonora mediante parámetros psicoacústicos.
[11] Segura, J., Cerdá, S., Montell, R., Romero, J., Cibrián, R., Barba, A., & Giménez, A. (2012). Los parámetros psicoacústicos como herramienta para la evaluación subjetiva de diferentes entornos y actividades.
[12] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). Psychoacoustics: Facts and models (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
[13] Rall, J. C., & Miyara, F. (2000). Análisis Dinámico Urbano: nuevos enfoques para actuar contra el ruido. Paper presented at the Actas del II Congreso Iberoamericano de Acústica
[14] REAL DECRETO 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. (BOE de 17/12/2005).
[15] DECRETO 104/2006, de 14 de julio, del Consell, de planificación y gestión en materia de contaminación acústica. (DOGV de 18/07/2006).
[16] DECRETO 266/2004, de 3 de diciembre, del Consell de la Generalitat, por el que se establecen normas de prevención y corrección de la contaminación acústica en relación con actividades, instalaciones, edificaciones, obras y servicios. (DOGV de 13/12/2004)
[17] Valero, C. S. (2013). Minería de datos para series temporales.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ACOUSTIC IMPACT ASSESSMENT OF WIND FARMS IN SPAIN: THE NEW APPROACH OF THE ANDALUSIAN REGULATION

PACS: 43.50.Sr

Grilo Bensusan, Álvaro;
INERCO ACÚSTICA S.L.
P.T. Aerópolis, C/Juan Olivert, 10.
41300 La Rinconada (Seville). Spain
Tel: 00 34 955 63 02 73 Fax: 00 34 955 63 04 22
E-Mail: agrilo@inerco.com
Web: www.inercoacustica.com

## ABSTRACT

A new regulation about noise management has entered into force recently and it has led to important changes in the acoustic evaluation of wind farms in Andalusia. The Decree 6/2012 approved the Regulations against Acoustic Pollution in the region, establishing new fixed noise limits for all noise sources and activities depending on zoning uses. As the previous regulation defined noise limits based on background noise, the newly regulation represents a different approach for the acoustic impact assessment of wind farms in southern Spain.

In this research paper an analysis of the implications of the new requirements in the acoustic evaluation for wind farms in Andalusia is presented through a case study where background noise measurements were measured at different wind speeds. The noise limits of Andalusian regulations are the compared with other International regulations in order to evaluate its adequacy for wind turbines noise management.

## RESUMEN

El Decreto 6/2012 ha introducido importantes cambios en el Reglamento de Protección Acústica de Andalucía, incluyendo la definición de nuevos valores límites en función de la zonificación acústica del territorio. Dado que la anterior normativa establecía límites subjetivos basados en ruido de fondo, el actual reglamento representa una diferente aproximación metodológica de la evaluación acústica de Parques Eólicos.

El presente estudio analiza los requerimientos acústicos para parques eólicos en Andalucía, a través de un caso de estudio donde se evaluó el ruido residual a diferentes velocidades de viento y mediante un análisis comparativo con otras normativas y estándares internacionales.

## INTRODUCTION

The new Decree for Acoustic Pollution in Andalusia was approved on the 17th of January 2012 (hereinafter referred as D6/2012). This regulation develops the national law, Royal Decree 1367/07 (RD1367/07), in the Andalusian region and is applied to any infrastructure, installation, machinery, project and private or public activity which could produce acoustic pollution due to noise or vibrations. Therefore, this law is in force for the acoustic assessment of wind farms, including the evaluation of noise levels at the nearest dwellings.

This paper focuses on the evaluation of the Noise Immision Level (NIE, as called in the D6/2012) at the facades of the nearest dwellings to the wind farm under study, considering the acoustic contribution of the wind turbines exclusively. For this purpose, a wind farm is considered as an industrial facility according to the requirements of the Decree 6/2012.

In general, the new Andalusian Regulation includes the legal provisions of the national law, regarding to noise indicators, noise limits, methodology of measurements, and key criteria for evaluation of the Noise Immision Level applied at wind farms. In this sense, the Decree 6/2012 establishes the noise limits for wind farms in the table VII of Chapter II, considering different zoning uses. These noise limits are applied at the façade of the buildings or at the external border of the acoustic areas.

| Areas | | Noise limits (dBA) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $L_{kd}$ **Day** | $L_{ke}$ **Evening** | $L_{kn}$ **Night** |
| a | Residential areas | 55 | 55 | 45 |
| b | Industrial areas | 65 | 65 | 55 |
| c | Recreational and entertainment uses | 63 | 63 | 53 |
| d | Touristic and tertiary uses (different to area c) | 60 | 60 | 50 |
| e | Educational, cultural, health activities or any sensitive use that requires a special protection. | 50 | 50 | 40 |

*Table VII Decree 6/2012. Noise limits for activities and regional port infrastructures (dBA)*

To support the implementation of the new regulation, the Andalusian Environmental Agency has published guidelines (CMA, 2012) where the applicability procedure of the regulation to wind farms is clarified:

1. According to the article 29, the Noise Immision Level (NIE) will be evaluated at the façade of the nearest building to the wind farm. For the measurements, the microphone has to be located at 1,5 meter distance and 1,5 meter height to the most exposed façade.

2. The applied noise limits for new wind farms (i.e. those holding a legal authorisation or that have already applied for it before October 24th 2007) will be the values mentioned in table VII. For existing wind farms, the noise limits are less restrictive attending to the increase of emission level of wind turbine due to decline of the installations. In this case, the noise limit of the table VII will be increased in 3 dBA for the evaluation of day, evening and night average and an increment of 5 dBA for short-time evaluation considering the worst scenario (measured in minutes).

The rest of technical issues for the application of the Andalusian Regulation, described in the Technical Annex II, are similar to the methodology of acoustic assessment provided in the National law (described in the Annex IV). Both regulations use the requirements of the standard ISO 1996-2:2007 for noise campaign in wind farm.

**MAIN CHANGES INTRODUCED BY THE NOISE REGULATION FOR ANDALUSIAN WIND FARMS**

The previous noise regulation, Decree 326/03 (hereinafter referred as D326/2003), was approved in 2003 and was the reference guideline for the acoustic assessment of wind farms until the publication of the Decree 6/2012 on March 6th 2012. The Decree 326/03 defined a different noise indicator in the article 23, called Acoustic Assessment Index (NAE according to Spanish acronym), that established a noise limit based on background noise. The noise indicator NAE was defined as an A-weighted equivalent continuous sound pressure level for a time interval of 10 minutes ($L_Aeq_{10min}$).

When Decree 6/2012 entered into force, the control of the noise emission of wind farms changed and the applied noise indicator became the Noise Immision Level (NIE according to Spanish acronym) as it is described in articles 29 and 30. This noise indicator NIE is defined as an A-weighted equivalent continuous sound pressure level ($L_keq$), for a time interval of, at least, 5 seconds and with different noise limits considering the urban zoning and the time periods (day, evening and night). The table below describes the main differences between both regulations in order to identify the main changes introduce in the evaluation of wind farm as an industrial facility:

<table>
<tr><th></th><th>Acoustic Assessment Index - NAE<br>Decree 326/2003</th><th colspan="3">Noise Immision Level - NIE<br>Decree 6/2012</th></tr>
<tr><td>Noise indicator</td><td>$L_Aeq_{10min}$</td><td colspan="3">$L_keq_T$</td></tr>
<tr><td>Penalties</td><td>Up to 5 dBA</td><td colspan="3">Up to 9 dBA</td></tr>
<tr><td>Adjustment due to reflections</td><td>None (open window)</td><td colspan="3">Incident sound</td></tr>
<tr><td>Time interval</td><td>10 minutes</td><td colspan="3">At least 5 seconds</td></tr>
<tr><td>Number of measurements</td><td>Al least 1</td><td colspan="3">Three records with a time-lapse of three minutes</td></tr>
<tr><td>Evaluation of background noise</td><td>Same methodology</td><td colspan="3">Same methodology</td></tr>
<tr><td>Height of microphone</td><td>Al least 1,2 meters height</td><td colspan="3">1,5 meters</td></tr>
<tr><td>Location of microphone</td><td>Open window</td><td colspan="3">At the facades of the building</td></tr>
<tr><td>Spatial/time sampling</td><td>Worst scenario</td><td colspan="3">Worst scenario</td></tr>
<tr><td>Time period</td><td>Day (7 AM – 11 PM)<br>Night (11 PM – 7 AM)</td><td colspan="3">Day (7 AM – 7 PM)<br>Evening (7 PM – 11 PM)<br>Night (11 PM – 7 AM)</td></tr>
<tr><td>Noise limits for new wind farms</td><td rowspan="4">Background noise + 5 dBA</td><td colspan="3">TABLE VII<br>Day/Evening: 55 dBA<br>Night: 45 dBA</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Noise limits for existing wind farms</td><td>TABLE VIII</td><td>Average Period (+3 dBA)</td><td>Short time evaluation (+5 dBA)</td></tr>
<tr><td>Day/ Evening</td><td>58</td><td>60</td></tr>
<tr><td>Night</td><td>48</td><td>50</td></tr>
</table>

*Table 1. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003 (Modified from Grilo, 2014)*

Based in this table results, the most important changes of Decree 6/2012 are as follows:

1. **<u>Noise limits applicable to Wind Farms:</u>** The main change of the regulation is the criteria used to establish noise limits, replacing the existing noise limits based on background noise for a fixed value of 55 dBA during day/evening and a value of 45 dBA during the night for residential uses.

Obviously, the consequences of this change are highly dependent on the location of the wind farm and the influence of specific noise sources at the surroundings of the wind turbines (road traffic or other industrial noise sources) that could increase the background noise levels. In Andalusia, most of the wind farms are located at open country and quiet areas (Figure 1), where the environmental noise is influenced exclusively by natural sound and the wind-induced noise.

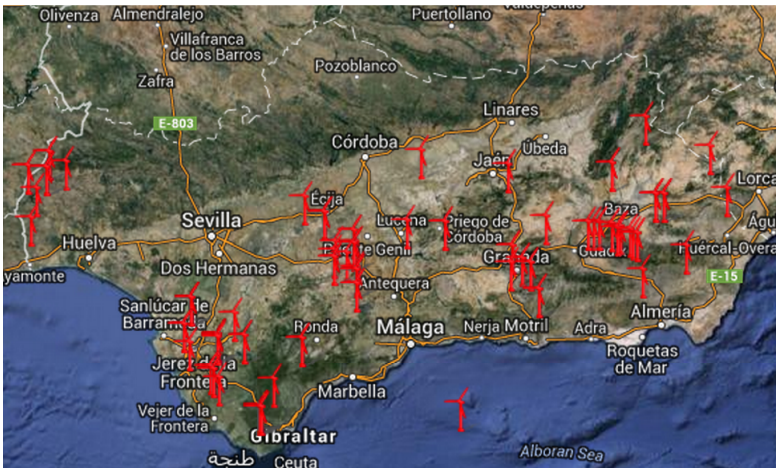



*Figure 1. Location of Wind farms in Andalusia (AEE, 2015)*

The Acoustic Laboratory of INERCO Acústica has carried out a wind farm noise campaign in South Spain to monitor the background noise at different locations according to ISO 1996-2:2007 during 8 days. In Figure 3 the results obtained from the correlation between the background noise levels, evaluated by $L_Aeq_{10min}$, and the wind speed at 10 meters height ($w_{10}$) for a rural dwelling at open country during the night period are presented. In this particular study, the microphone was situated in an opened window at the ground floor, identified as the most exposed faces of the nearest dwelling from the wind farm.

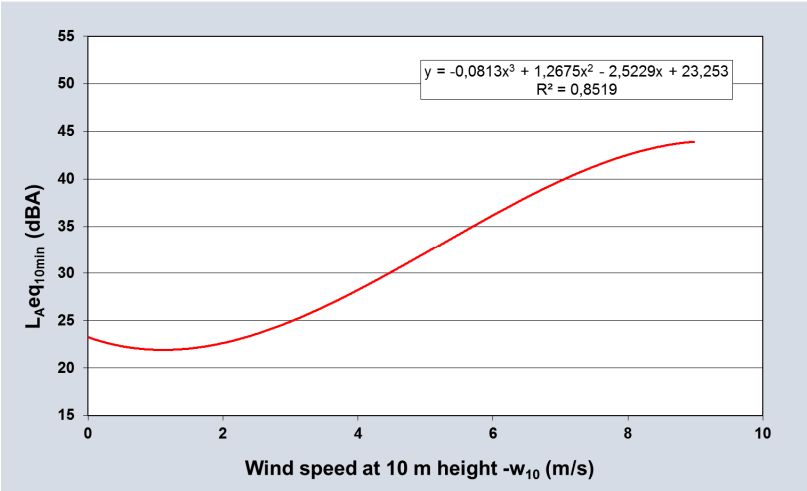



*Figure 3. Correlation between the background noise levels and the wind speed at 10 meters height during the night for a studied wind farm.*

Taking into account the obtained background noise levels (Figure 3), it is possible to compare noise limits using the previous regulation (D326/2003) and the current applicable limits following the table VII of Decree 6/2012.

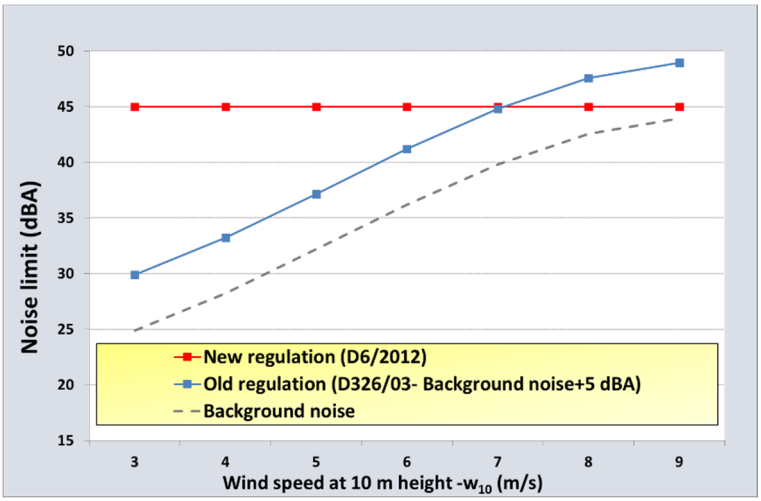



*Figure 4. Noise limits of Wind farms for residential uses and night period for a studied wind farm*

According to Figure 4 and considering the night period (worst scenario), the new regulation is less restrictive than Decree 326/2003 for wind speed up to 7 m/s. Particularly, at quiet areas, and when the wind speed is below 7 m/s, the background noise appears to be specially low, between 20 dBA and 40 dBA according to our measurements. On the contrary, for the study area, the previous regulation seems to be only more permissive when high wind speeds (more than 8 m/s) are reached and when wind-induced noise exceeds 40 dBA.

As a conclusion, it can be said that for wind farm situated at quiet areas, the noise limit based on background noise (Decree 326/2003) provides a special protection against sound emergence when the environmental noise is low whereas it is more permissive when higher wind speeds are reached and when the wind induced background noise exceeds 40 dBA.

2. **<u>Adjustments due to tonality, impulsiveness, low frequency and low background noise</u>**: Analysing the differences due to the corrections of tonality, impulsiveness, etc. both regulations were compared (table 2). The previous noise regulation included a correction related to low background noise (evaluated by $L_{90}$) in order to protect the quietness at natural areas. However, this correction was not incorporated to the current regulation, but a new adjustment due to low frequency noise has been included.

| | **Previous Regulation Decree 326/2003** | **Current Regulation Decree 6/2012** |
|---|---|---|
| **Correction due to low background noise (evaluated by $L_{90\text{-}10\ min}$)** | $L_{90}$ / P<br>≤ 24 / 3<br>25 / 2<br>26 / 1<br>≥ 27 / 0 | Non defined |
| **Correction due to tonality** | 5 dBA (if exists) | 3 - 6 dBA depending of the range of tonality |
| **Correction due to impulsiveness** | 2 – 5 dBA | 3 – 6 dBA |
| **Correction due to low frequency** | Non defined | 3 – 6 dBA |
| **Maximum correction** | 5 dBA | 9 dBA |

*Table 2. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003*

There are two differences that can greatly influence the acoustic assessment of wind farms:

- The maximum value of the correction increases until 9 dBA instead of 5 dBA. When the presence of tonality and low frequency is demonstrated at a wind farm, the measured noise

level may be increased up to 9 dBA according to Decree 6/2012, always depending on the characteristics of these components.

- The presence of low frequency at the spectral emission of the wind turbine is penalized by the actual regulation with 3 or 6 dBA, depending on the measured difference between $L_C$eq and $L_A$eq.

As example, the table 3 shows the calculated correction according to both regulations using data from a noise campaign developed by INERCO Acústica. At the study location, only low frequency correction were identified and the total adjustment according to D6/2012 was 6 dBA versus the null value of D326/2003.

| **Corrections according to Decree 326/2003** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Wind speed w10 (m/s) | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Low background noise correction (P) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tonality correction (K1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Impulsiveness correction (K2) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total adjustment (A=P+K1+K2≤5dBA) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Corrections according to Decree 6/2012** | | | | | |
| Wind speed w10 (m/s) | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tonality correction (Kt) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Low frequency correction (Kf) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Impulsiveness correction (Ki) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total adjustment (K=Kt+Kf+Ki≤9 dBA) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

*Table 2. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003*

As the new regulation introduces new adjustments that were not required by the previous legal guidelines, the comparison between the noise limit shown in Figure 5 must be modified considering the correction due low frequency from table 3.

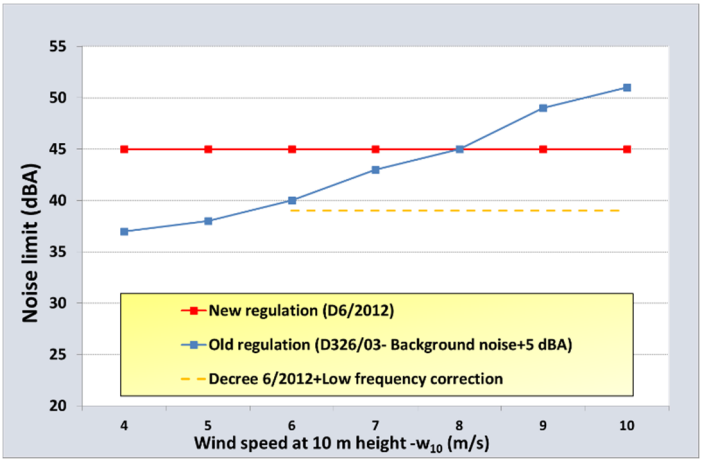



*Figure 6. Comparison of Requirements of D6/2012 and D326/2003 considering the application of low frequency correction for a studied wind farm.*

The comparison of noise limits from both Regulations, considering the new correction due to low frequency noise, shows that Decree 6/2012 is more restrictive than the former law for all measured wind speeds.

3. **Time interval of the measurements:** Although internationally recommended time interval for wind farms monitoring is 10 minutes (as defined in Decree 326/2003), Decree 6/2012 allows the development of measurement during shorter intervals (at least 5 seconds). In order to get representative samples of the noise immision levels, 1 minute intervals may be recommended for the evaluation of the noise emission from wind turbines. The total duration of the noise

campaign might be reduced, even improving the relationship between the noise levels and the wind speed, due to the relevant number of 1-minute samples.

Using synchronized sound and meteorological data, different methodologies may be used (polynomial regression, binning method or probability distribution) for the statistical analysis of the measurements. Figure 6 displays the results of the analysis of a monitoring campaign at a wind farm, using the binning method (Asthiani & Titus, 2011) applied to 1-minute records.

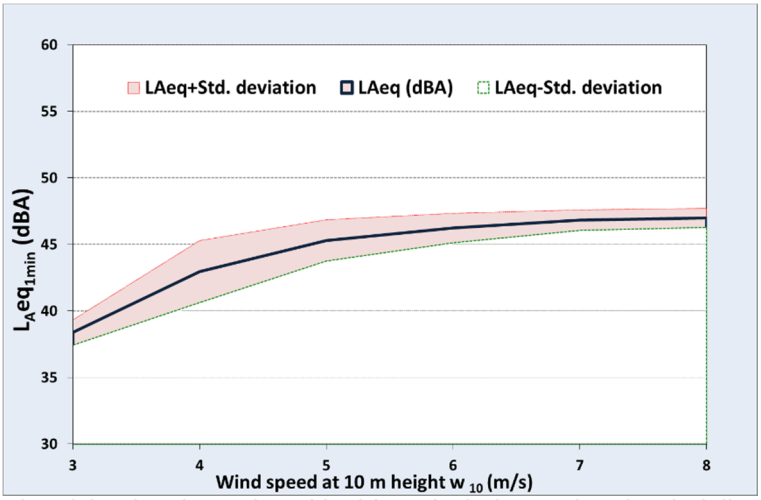



*Figure 6. Noise immision levels analysed by binned wind speeds. The dark line represents the mean $L_Aeq_{1min}$ within each bin. The shaded zone represents one standard deviation.*

The obtained results were highly representative of the acoustic situation at the nearest dwelling from the studied wind farms, due to a measurement basis of 1 minute interval during 8-days monitoring campaign was set. Thus the calculated deviation error was improved.

4. **Comparison with International Noise Limits:** The existing guidelines for the acoustic assessment of wind farms consider noise limit based on background noise (e.g. Turkey), based on fixed values (e.g. Spain) or using both of them (e.g. Ontario or France). Comparing the actual noise limits in Andalusia for residential uses and night period, with other guidelines from United States and Europe (figure 6) shows that noise limits of the current regulation in Andalusia are less restrictive than the reviewed standards and the recommendations of other guidelines (IOA, 2013), but according to the World Organization of Health guidelines (WHO, 1999). Furthermore, considering the correction due to low frequency noise (up to 6 dBA), the noise limits for night period become closer to those applied in other countries (39 dBA).

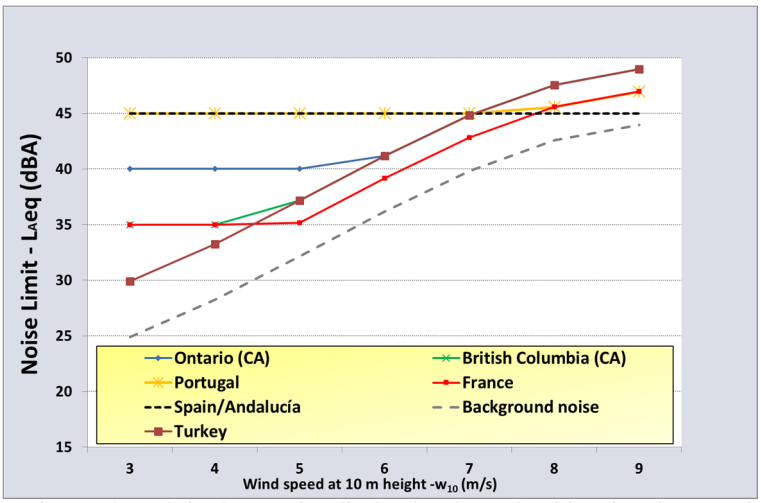



*Figure 6. Comparison of Andalusian Noise limits (D6/2012) with other international regulations* (Arcadis et al., 2013; Goemé, 2015)

Currently, the main challenge for the acoustic assessment of wind farms in Andalusia is therefore the classification of the noise sensitive receivers when the urban planning is not available. A rural dwelling used as a second residence (usual situation in the region), situated in open country then should be classified as a residential use if the right acoustic quality has to be guaranteed. Otherwise, its classification below any different use (areas b, c or d from Table VII – D6/2012) might prevent the compliance of WHO recommendations.

## CONCLUSIONS

The entry into force of a new regulation Decree 6/2012 has led to important changes in the acoustic evaluation of wind farms in Andalusia, establishing new fixed noise limits depending on zoning uses instead of previous limits based on background noise. Despite the fact that some changes in the regulation with respect to the former one might affect residential uses negatively, the noise limits set are more restrictive than the previous ones due to the inclusion of a new correction in low noise frequency, characteristic of noise emission from wind turbines. In this sense, the Decree 6/2012 of Andalusia fulfils the recommendation of the World Organisation of Health for the protection of sensitive uses during the night.

## REFERENCES


AEE. 2015. *Mapa Eólico de Andalucía*. [ONLINE] Available at: http://www.aeeolica.org/es/map/andalucia/. [Accessed 30 January 15]

Arcadis, K. F., Avenue, F., Arcadis, E. K., Box, P. O., and Arnhem, A. G. (2013). *Noise International Legislation and Regulations for Wind Turbine Noise*, Proc. 5th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Denver, US. 1–22

Ashtiani P. and Titus S., 2011. *Analysis of noise immission levels measured from wind turbines*. Proceedings of the 4th International Meeting on Wind Turbine Noise; 2011. Rome, Italy. INCE Europe. ISBN: 978-88-88942-33-9.

Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, 2012. *Guía de Contaminación Acústica.* Junta de Andalucía, Noviembre de 2012.

Decreto 6/2012, de 17 de Enero, *por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía*, Boletín oficial de la Junta de Andalucía, número 24. Pp. 7-37.

ETSU-R-97, *The assessment and rating of noise from Wind Farms, Final ETSU-R97* Report for the Department of Trade & Industry. UK Noise Working Group, 1997.

Goemé, A. (2015). *Comparative analysis of wind turbine noise assessment and rating procedures in the UK, France and the Netherlands*. Proc. 6th Int. Meet. Wind Turbine Noise. Glasgow, Scotland.

Grilo A, 2014*. Implicaciones del Nuevo Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía sobre las Actividades Industriales Existentes: un Caso Práctico*. Official publication of 45th Spanish Congress on Acoustics. Murcia. Pp. 747-755.

IOA 2014. *A Good Practice Guide to the Application of ETSU-R-97 for the Assessment and Rating of Wind Turbine Noise*. Institute of Acoustic. Hertfordshire (UK)

ISO 1996-2:2007 Acoustics: Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise

World Health Organization (WHO), 1999. *WHO guidelines for community noise*. Copenhagen.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DYNAMAP PROJECT: HARDWARE SPECIFICATIONS UPDATE

Referencia PACS: 43.50.Rq

Luca Nencini (1), Joan Claudi Socoró Carrié (2)
(1) Bluewave Acoustics, Via del Fonditore 344 - Follonica(GR) - Italy
(2) GTM - Grup de recerca en Tecnologies Mèdia, La Salle - Universitat Ramon Llull

nencini@blue-wave.com; jclaudi@salleurl.edu

**ABSTRACT**
The Dynamap Life+ project foresees the installation of low cost sound level meters in order to set up a wireless distributed noise monitoring system, aimed at automating the update process of road noise maps. In this work an update of the technical part of the project progress is given.

## INTRODUCTION

The DYNAMAP project has been approved for co-financing by the European Commission through the Life+ 2013 program. DYNAMAP aims at the installation of a prototype system in the municipalities of Rome and Milan, based on a pervasive low-cost noise monitoring network. The project's goal is to develop a dynamic noise mapping system able to detect and represent in real time the acoustic impact due to road infrastructures. Scope of the project is the European Directive 2002/49/EC related to the assessment and management of environmental noise (END)[1]. In particular, the project refers to the need of updating noise maps every five years, as stated in the END. In this work a short report is given, regarding the preliminary network's design and the technical choices resulting from the analysis conducted during the preparatory activities of the project.

## AN OVERVIEW OF THE DYNAMAP SYSTEM

The DYNAMAP system will be tested in two pilot areas, using 50 sensors:

1 - The first pilot area will be located in the city of Milan and will cover a significant portion of the town including different types of roads and acoustical scenarios. Roads will be classified and assigned to clusters, based on traffic characteristics. Twenty five roads representative of the clusters will be continuously monitored to provide noise levels for noise maps updating.

2 - The second pilot area will be located along a major suburban road: the ring road surrounding the city of Rome. Sensors devices will be installed in hot spots where vehicle counting devices are unavailable to feed the dynamic mapping system with real time information on noise levels. About 25 devices will be used to provide information on the noise levels caused by the ring road traffic and dynamically update noise maps.

In order to characterize road noise, the acoustic signal will be processed, excluding any relevant non road-related noise. In order to accomplish this task, at this stage of the project, the partners who have in charge the development of the sensors (Bluewave acoustics) and the

implementation of the Anomalous Event Noise Detection algorithm (GTM – La Salle), agreed to evaluate the possibility of implementing this functionality on each monitoring node. The main reason was to obtain a more scalable system, because if the signal processing is distributed then the need of variable computational load at the central server (e.g. depending on the number of monitoring stations, the transmission of raw audio data or some type of acoustic parameters and its further analysis could be very complex) is avoided.

For each sensor, a classified output like this should be produced every second:

00001 – 151021113200 - 58.0 - 0

The first number is the sensor identifier, the second number is a timestamp, the third is a dB(A) level and the fourth one is an indicator standing for “road” or “non road” event. All those data will be stored in a remote web server by mean of wireless data communication system like GPRS or 3G.

Levels without spurious events will be averaged on a time period that will be defined in order to make the mapping model properly work. The magnitude order of this period should be ranging from some minutes to an hour. This time period will be the temporal base to update the map.

For each of the monitored road source and for the remaining road sources a complete noise map is calculated and saved for the entire mapping area by logarithmic sum of the single maps weighted then with measured level as shown in the scheme below. This application is nowadays extremely fast as no further recalculation of the sound propagation is required to adapt the noise map to the measured data.

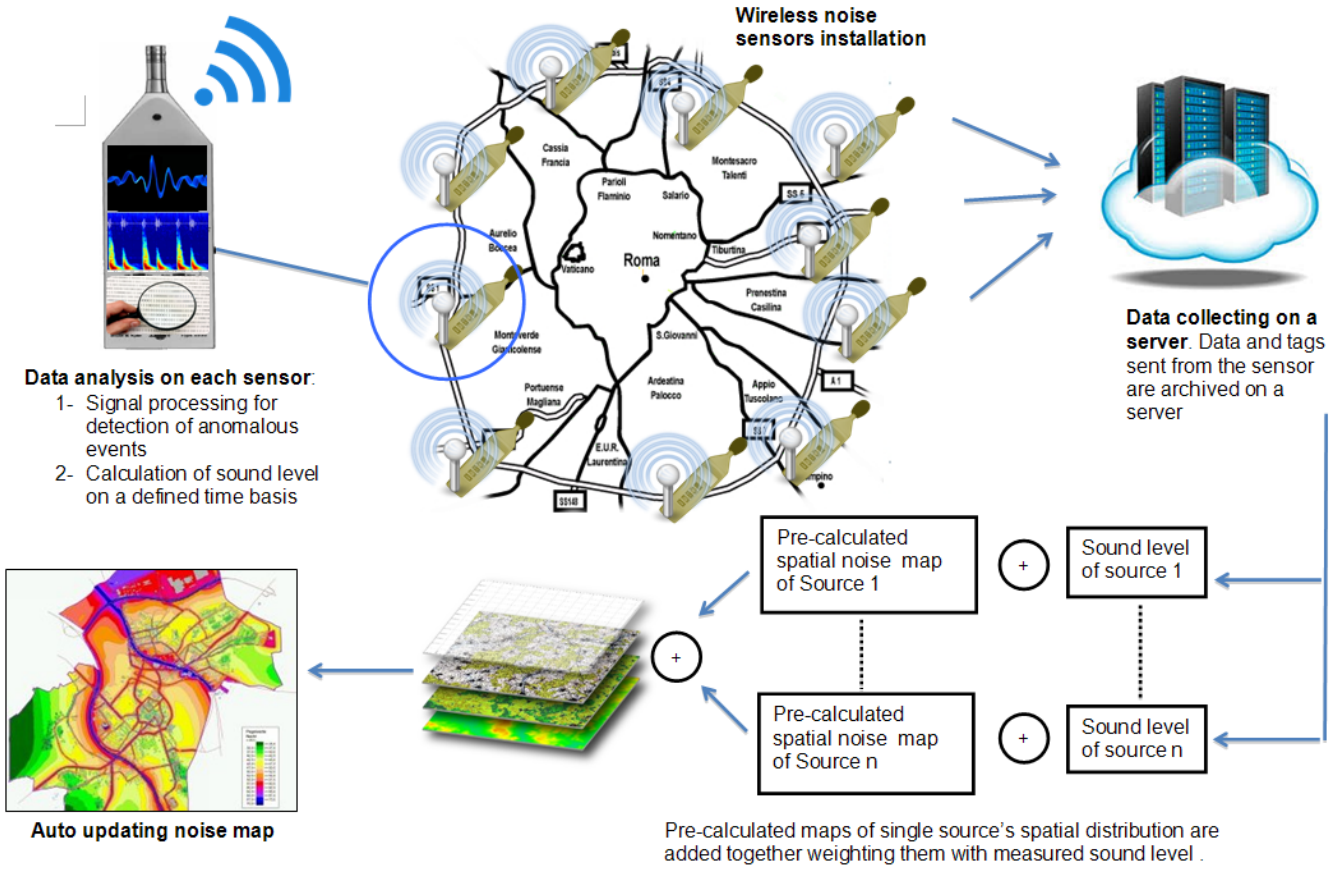



Figure 1 – DYNAMAP working principle

## TYPES OF LOW COST NOISE MONITORING NETWORKS

There are many ways of classifying a sensor network (according to network topology, to transmission protocols, etc.). For the purpose of this paper, sensor networks for environmental noise monitoring can be roughly distinguished in two different groups: embedded pc based and microcontroller based. These two kind of devices are described below:

- Embedded pc monitoring systems
In the last decade, the exponential growth in computing technologies made possible to reduce a lot the computers size. Actually it is possible to find small computer boards having size less than 10x10 cm at very cheap prices, equipped with high quality sound board. Such system can be equipped with gprs/3g/4g modem or Wi-Fi connection and a signal analysis software that processes incoming data from the sound board, using a cheap microphone. These kind of system present the advantage of being low cost and they can be remotely fully updated and reprogrammed. Moreover they can be coded with specific algorithm executing particular complex tasks as noise recognition, source position tracking etc. The disadvantage of those systems is the high power consumption, that is actually at least 2-3 W, so they need direct power supply or big solar panels making difficult the application for a very pervasive monitoring using hundred of sensors.

- Microcontroller and digital signal processor systems
The main advantage of this kind of system is the possibility to implement low power applications (200 mW mean equivalent consumption or less) that permit to power these devices with solar panels or with other energy harvesting systems. The disadvantage of those systems is the reduced possibility to modify and remotely control the device in order to implement complex tasks.

Well known standard noise monitoring systems compliant to class I IEC 61672[2] (like ones like Norsonic, Bruel&Kjaer, 01dB etc.) are usually made using technology described in the second group.

## TECHNICAL DETAILS OF THE MONITORING STATIONS USED IN DYNAMAP

Due to prototypal nature of the sensors network to be installed, it is advisable to use a flexible system that can be remotely accessed and programmed in order to run and calibrate specific audio processing scripts. So we abandoned the idea of using microcontroller based sensing nodes and to use instead embedded computers that offer the advantages described before. Another advantage given by this choice is the possibility to pre-process data on sensor boards to make events detection, and avoiding to send a lot of acoustic data to the central server as said before. This will also guarantee better scalability of the system, reducing the computational load on the central server if the number of sensing units is increased.

A first set of basic specifications has been defined for each monitoring station and it is listed below:

- 40-100 dB(A) broadband linearity range
- 35-115 dB working range whit acceptable THD and narrowband floor noise level
- 1 second time base Leq(A) level
- Possibility of audio recording
- Internal circular backup data storage of calculated data
- VPN connection
- GPRS/3G/WiFi connection

## CONCLUSIONS

This paper lists some basic features and technical specifications of hardware devices that are meant to be used in the Dynamap project. Due to the prototypal nature of the whole system, the use of embedded computers seems to be the better solution to perform all the tasks required and to guarantee a direct control on each monitoring node. The results of this kind of implementation will pave the way for a future process of hardware optimization aimed at reducing dimensions and power consumption of the devices, in order to make possible a very wide spreading of this kind of technology.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research presented in this work has been co-financed by the LIFE DYNAMAP project (LIFE13-ENV/IT/001254).

## BIBLIOGRAPHY

[1] EU Directive (2002), Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise, Official Journal of the European Communities, L189/12, July 2002.
[2] IEC 61672 (2013) Electroacoustics - Sound level meters

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# PUBLICACIÓN DE MAPAS ESTRATÉGICOS EN PLATAFORMA DE MAPAS DE RUIDO ONLINE

**PACS: 43.50.Sr**

Notario Tévar, Antonio
Datakustik GmbH
C/ Calera 3, Loft 49
28760 Tres Cantos
España
+34 91 219 08 78
antonio.notario@datakustik.com

**ABSTRACT**

According to Article 9 of the 2002/49/EC[2] Directive the Member States have to ensure that Strategic Noise Maps are made available to the public in a clear, comprehensible and accessible way. On the other hand the information should be updated every 5 years. Within such noise mapping projects, any modification of data which needs manpower can raise the time and cost enormously. A technique based on scripting is presented for automating time consuming tasks such as iterating over different configurations of calculations, summing up source-specific noise maps including level corrections or exporting maps to an Online Noise Map Interface.

**RESUMEN**

De acuerdo al Artículo 9 de la Directiva 2002/49/CE[2], los Estados Miembros deben asegurar que los Mapas Estratégicos de Ruido son accesibles para los ciudadanos y presentados de una forma clara y comprensible. Por otro lado, esta información debe ser actualizada cada 5 años. En este tipo de proyectos, cualquier modificación que requiere mano de obra puede aumentar enormemente el tiempo y coste. En la presente comunicación se presenta una técnica basada en scripting para automatizar tareas repetitivas tales como la iteración de distintas configuraciones de cálculo, post proceso de mapas de ruido o exportación de resultados a entornos online.

## INTRODUCCION

La principal función de los softwares de predicción de ruido es simular una situación con el fin de predecir el ruido en entornos abiertos de mayor o menor complejidad. Estas predicciones se extienden a nuevas situaciones futuras que pueden incorporar medidas de reducción de ruido tales como pantallas, replanteamientos de tráfico, etc. Asimismo, el software debe permitir la comparación de dichas alternativas con el fin de evaluar la más ventajosa en términos de reducción de ruido e inversión total.

Los cálculos se ejecutan siguiendo una serie de métodos de cálculo o normas de uso internacional o nacional; ejemplos de métodos son los modelos recomendados por la Comisión Europea, que recientemente han sido sustituidos por los nuevos métodos comunes

CNOSSOS-EU[1]. En cualquier caso, el estudio estratégico del ruido en aglomeraciones incorpora distintos aspectos a considerar, que van más allá de la mera técnica de cálculo. Por ejemplo, los mapas de ruido necesitan ser actualizados cada cierto tiempo, para incluir tanto las modificaciones en los parámetros de entrada (ej. Nuevos tráficos, nuevos emisores) como las medidas de reducción de ruido implementadas fruto de los planes de acción de la ronda anterior. Otro aspecto necesario es la necesidad de informar a la población expuesta. En concreto, el Artículo 9 de la Directiva 2002/49/CE[2] especifica que los Estados Miembros deben asegurar que los Mapas Estratégicos de Ruido son accesibles para los ciudadanos y presentados de una forma clara y comprensible.

Dentro de lo considerado como claro y comprensible, existen diferentes alternativas. Muchos países optan por la creación de una plataforma oficial[3], donde los resultados son exportados a una plataforma en formato procedente de sistemas GIS y presentados gráficamente. Las ventajas son entre otras, la homogeneización de datos de entrada y salida, así como el establecimiento de un estándar. En el presente trabajo se presenta un proyecto de creación de mapas online de ruido, que puede ser fácilmente implementado sin conocimientos previos de programación de páginas web, lo que facilita su creación y mantenimiento.

## CONCEPTOS BÁSICOS DEL SCRIPTING MEDIANTE LUA

Lua[4] es un popular lenguaje de programación diseñado para ser utilizado tanto por programadores como por no programadores indistintamente. Su sintaxis es reminiscente del lenguaje Pascal y por tanto, familiar a muchos usuarios y relativamente sencillo de dominar. En el ámbito del software de simulación CadnaA[5], se ha incorporado un intérprete que permite utilizar scripts Lua en el programa con el fin de automatizar tareas repetitivas e incluso partes del flujo de trabajo normal de CadnaA. La integración CadnaA – Lua permite:

- Acceder a los atributos de los objetos de CadnaA (a través de identificadores)
- Acceder a variables de texto
- Acceder a los vértices de los polígonos de cualquier objeto
- Ejecutar rutinas para ejecutar operaciones en grupos de objetos.

Los tipos de datos incluyen comentarios, números, valores lógicos usados para la comparación, cadenas de caracteres y objetos Lua. También cuenta con diversos tipos de operadores aritméticos, de asignación, de concatenación, de comparación y operadores lógicos. Por supuesto también permite el control de flujos y rutinas mediante un conjunto típico de comandos `if then elseif else`. Por último, también es posible definir funciones y tareas directamente.

A modo de ejemplo, se presenta un sencillo script Lua. El script añade una fuente puntual q al proyecto y la mueve a una posición dada para calcular la malla. El proceso se repite 400 veces y con cada iteración, la fuente puntual se desplaza 25 metros a lo largo del eje x. Por tanto, los 400 mapas de ruido resultantes muestran cómo los niveles de ruido cambian mientras la fuente puntual se desplaza a lo largo de 1 km:

```
local x
local q = cna.tables.pt_src:append()
q.LW_LI = 100
for x = 0,1000,25 do -- x en pasos de 25 m
    q.X = 100 + x -- fija posición
cna.calc_grid() -- calcula la malla
  --guardar la malla (el nombre de archivo contiene la posición x)
   cna.save_grid ("Resultado_" .. x .. ".cnr")
  --guarda en el directorio que contiene el archivo Lua
end
```

**Fig. 1**: Ejemplo de Script escrito en CadnaA-Lua

Después de declarar la variable que contiene la posición x (`x`) y la fuente puntual (`q`), el contador se incrementa en pasos de 25 metros desde 0 hasta 1000. `q` es una referencia a un nuevo objeto de CadnaA (fuente puntual) y es creado en Lua mediante el método `cna.tables.*:append()`. En cada iteración, el atributo `X` de la fuente puntual se modifica y la malla se calcula y guarda. Con el fin de tener varios archivos de malla resultantes, el nombre de cada una se genera mediante la expresión "`grid_" .. x .. ".cnr`"

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE SCRIPTS LUA EN PROYECTOS DE CÁLCULO DE MAPAS DE RUIDO

Como se ha comentado anteriormente, la utilización del lenguaje Lua permite la automatización de tareas que de otro modo resultarían muy tediosas. A continuación se presentan varios ejemplos de aplicaciones reales.

### Simplificación de modelos digitales de terreno

En el contexto de grandes proyectos de simulación[6] donde el modelo de elevación de partida es excesivamente detallado, es necesario aplicar métodos que permitan la simplificación de la topografía manteniendo unos límites de error aceptables. En el Proyecto realizado por DataKustik en el territorio de North-Rhine Westphalia[6] el área de estudio fue de 36.540 km$^2$. El modelo de elevación fue importado empleando una malla densa de datos de 10 x 10 m y simplificado mediante la aplicación de estos métodos. El resultado fue la simplificación de la topografía a 2,6 millones de puntos de elevación con una precisión en altura de 2 m.

### Iteraciones de Cálculo

Es sabido que en ciertas situaciones y empleando ciertos métodos de cálculo, el nivel de presión sonora en dos receptores cercanos puede variar sustancialmente. La razón es que en ciertos métodos de cálculo, el nivel local tiene una precisión espacial menor que con otros. Con el fin de evaluar esta dispersión de resultados, el nivel de presión sonora puede ser calculado iterativamente con pequeños cambios en un parámetro de entrada esencial (e.g. la coordenada x del emisor). Esta iteración puede ser definida con un script Lua. La idea es calcular el nivel de ruido en *N* receptores alrededor del receptor original, y separados de este 1 m. Para los *N* receptores, el script puede calcular la media aritmética μ y la desviación típica σ. Estos dos valores, empleados para cuantificar la distribución de niveles de ruido, se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \sum_{i=0}^{N} x_i \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=0}^{N}(x_i - \mu)^2} \tag{2}$$

El concepto es válido también para comparar configuraciones de cálculo y cuantificar la diferencia de resultados en función del cambio de un parámetro concreto en pequeñas cantidades, o bien para evaluar las diferencias de niveles en un modelo concreto empleando distintas normas de cálculo.

### Importación de datos en formato XML – Open Street Map

Otra aplicación interesante es la posibilidad de uso de Lua con el fin de importar un archivo de datos XML. Un ejemplo de este tipo de datos es la plataforma Open Street Map (OSM). OSM es una plataforma colaborativa de creación de mapas basados en datos GPS. En este caso, el

script Lua se encarga de leer e interpretar el archivo XML mediante un parser, para finalmente filtrar los atributos (*tags*) relevantes para CadnaA y crear los objetos correspondientes.

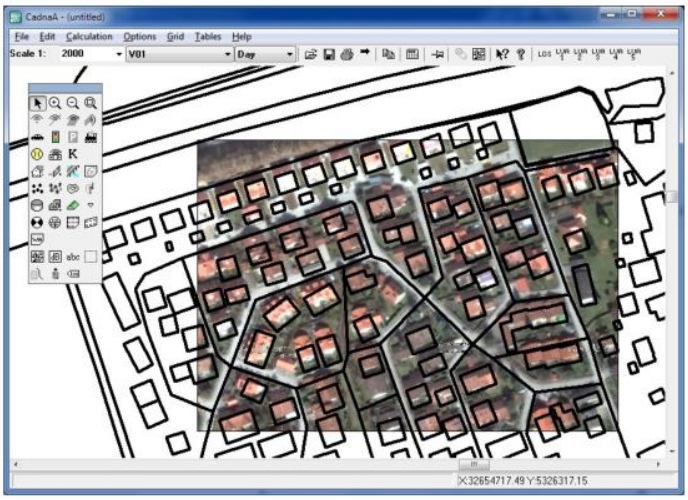



**Fig. 2**: Importación de un archivo en formato Open Street Map (OSM – XML) mediante un script Lua. En el modelo se ha importado una imagen de GoogleEarth para verificar la posición de los objetos. Es importante recalcar que ni los datos procedentes de GoogleEarth ni los procedentes de la plataforma OSM están sujetos a una determinada resolución o precisión.

Más allá de la importación en formato OSM, la dimensión de aplicar Lua en este caso es que el formato XML (e***X***tensible ***M***arkup ***L***anguage) es un estándar de intercambio de archivos empleado por un amplio número de empresas y aplicaciones de entorno GIS y Web. Dado que muchas empresas y organizaciones desarrollan formatos XML internos o usan variantes propias, la aplicación de scripts Lua en CadnaA los hacen accesibles para emplearlos en la evaluación del ruido ambiental.

## APLICACIÓN DEL SCRIPTING LUA A LA PUBLICACIÓN DE MAPAS ONLINE

Como ejemplo de aplicación, a continuación se explica en mayor detalle el uso de un script Lua para obtener un mapa de ruido interactivo y publicable, llamado Plataforma de Ruido Online (MRO).

### Arquitectura de Software y Conceptos Básicos

La plataforma de Mapas de Ruido Online (MRO) consiste en dos partes diferenciadas. Por un lado el código de la plataforma, que es básicamente un sitio web HTML/JS/CSS y que hace las veces de carpeta plantilla. Por el otro, los datos del mapa / escenario, que son exportados desde el archivo del software de simulación de CadnaA.

La plataforma MRO no incluye ningún código que deba ser ejecutado en el servidor (por ejemplo, código PHP, Servlet, ASP, etc.), sino que todo el código se ejecuta desde un interfaz de usuario (entendiendo como tal, la persona que consulta los datos desde internet). Por tanto, para alojar la plataforma MRO sólo se requiere un simple servidor HTML. Sin embargo, dicho servidor debe ser configurado para alojar contenido estático.

### Aspectos Previos

Mientras la plataforma MRO se asemeja a la interfaz de CadnaA de alguna manera, existen importantes diferencias que hay que tener en cuenta. La primera de ellas es que un escenario tiene 4 parámetros de evaluación (normalmente $L_d$, $L_e$, $L_n$ y $L_{den}$), lo cual supone un problema si

se desea exportar mapas de ruido y contaminantes atmosféricos, por ejemplo. Esta limitación se soluciona en la propia estructura del MRO. Por otro lado, dado que en ocasiones se exportan resultados de distintas "fuentes" – como antes de ha citado, ruido y contaminación atmosférica – es necesario asegurarse que los datos exportados no son divergentes o contradictorios. La razón principal es que el MRO está optimizado para la web y el concepto de seccionamiento del mapa se basa en los límites de malla y en las distancias entre puntos:

- Los límites de todas las mallas deben coincidir. Si no es así, deben hacerse coincidir exportando y re importando los puntos de malla.
- El espaciado de las mallas debe coincidir. En caso contrario, existirán discrepancias entre las escalas de las diferentes variantes. Por ejemplo, una discrepancia en potencia de 2 puede ser ajustada mediante interpolación o extrapolación (oversampling).

### Preparación del Modelo

Suponiendo un Proyecto de CadnaA llamado ***project.cna*** y que consiste en 4 variantes que han sido calculadas a razón de 4 parámetros por variante – siendo la última la que contiene parámetros de contaminación atmosférica - deben guardarse primero como 4 archivos independientes y asegurar que los parámetros de evaluación a exportar son los correctos. La razón es que dichos parámetros son los identificadores que serán exportados al MRO.

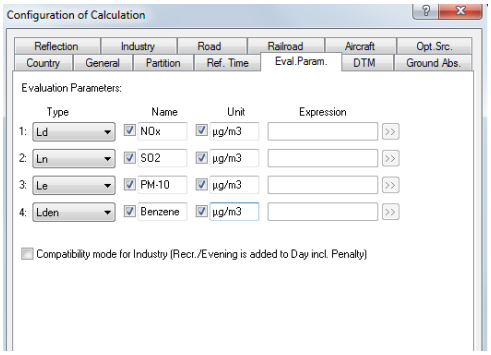



**Fig. 3**: Asignación de los parámetros calculados a las unidades de cada tipo de contaminante

### Comprobación del espaciado de receptores

En este paso, es necesario asegurar que el paso de malla es el mismo, mediante la inspección del correspondiente diálogo para todas las mallas a exportar. Asimismo, los límites de malla han de coincidir.

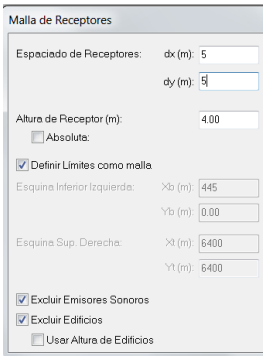



**Fig. 4**: Comprobación del espaciado de la malla de cálculo

### Preparación del Script CadnaA-Lua

La exportación se realiza mediante la ejecución del correspondiente script Lua. El objetivo es automatizar la misma operación para múltiples archivos de CadnaA, ya que de otra forma el tiempo invertido en comprobar cada archivo y realizar la exportación manualmente sería muy alto. La gran ventaja de los scripts Lua es que pueden ser adaptados a las necesidades del usuario, partiendo de la base del script original, Por ejemplo, un proyecto con resultados de ruido – con un paso de malla de 10 x 10 metros – y de contaminación atmosférica – con un paso de 5 x 5 metros – puede ser exportado mediante el script que previamente ejecuta una interpolación para ajustar las mallas. La estructura del script es la siguiente:

1. Especificación de las rutas de entrada – donde está el proyecto - y salida – donde los archivos exportados han de guardarse –

2. Definición de las variantes del proyecto: asignación de cada archivo a cada variante por medio de variables y especificación del nombre que cada variante tendrá en el MRO.

3. Comprobación de los límites de todas las mallas: las variantes son cargadas previamente para comprobar que los límites de malla coinciden.

4. Rutina de exportación: finalmente, las variantes son exportadas en formato Web-Bitmap – colecciones de imágenes a distintas resoluciones que coinciden con los distintos niveles de zoom que tendrá el MRO-. En esta sección, si existen diferentes espaciados entre receptores – caso de mapas de ruido y de contaminación atmosférica – se puede incluir un reajuste automático.

### Ejecución del Script en CadnaA

Los scripts Lua se cargan en CadnaA mediante el comando de ejecución de scripts. Además, es posible asignar diferentes scripts a diferentes botones directos.

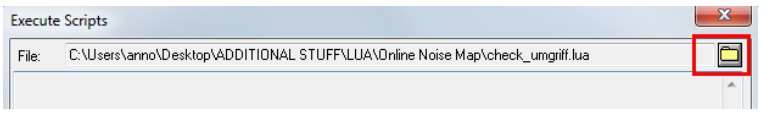



**Fig. 5**: Asignación del Script Lua en CadnaA

### Integración de los datos en la plataforma MRO

El siguiente paso es incorporar los datos exportados en la plataforma MRO. Dicha plataforma tiene la siguiente estructura de carpetas:

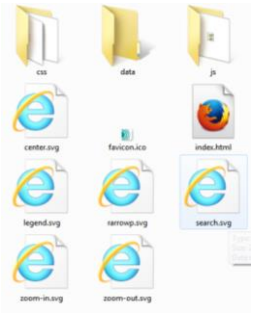



**Fig. 6**: Estructura de la Plataforma MRO. Los archivos exportados por CadnaA en formato Web-Bitmap son guardados en la carpeta "data"

Los archivos exportados han de ser incluidos en la carpeta "data" de forma directa, es decir, sin incluir subcarpetas.

### Comprobación de la Plataforma MRO

Para comprobar la plataforma MRO es necesario alojar todo el conjunto de carpetas en un servidor web o ejecutar un servidor en el PC local. En la mayoría de casos, es suficiente abrir directamente el archivo "Index.html". En caso de actualización del mapa, los nuevos archivos exportados reemplazan a los anteriores, por lo que se trata de una acción de copiar y pegar archivos.

Una vez se ha abierto el MRO, la interfaz web accesible desde cualquier navegador presenta las siguientes características. Es posible abrir una leyenda de colores y navegar / hacer zoom mediante las flechas de dirección e iconos de lupa o bien directamente empleando el desplazamiento / rueda del ratón. Asimismo, permite alternar entre distintas variantes / parámetros de evaluación, incluyendo los relativos a la contaminación atmosférica. El valor calculado en cualquier posición se actualiza y se muestra en una ventana próxima al puntero del ratón.

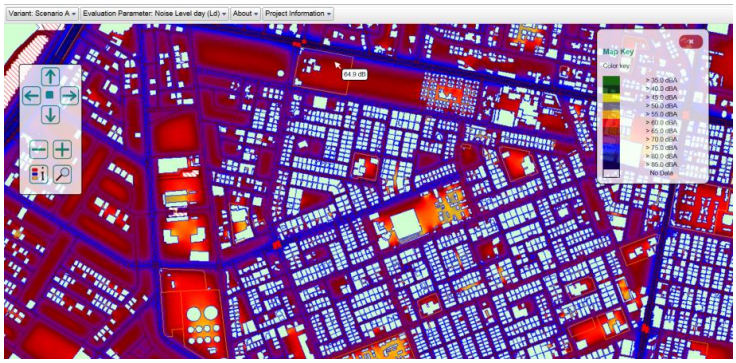



**Fig. 7**: Interfaz web del MRO. Mapa de Ruido día de la variante A




**Fig. 8**: Mapa de contaminación por NOx

También existe la posibilidad de buscar una calle mediante un buscador integrado, siempre y cuando el atributo de nombre de calle haya sido incluido en el modelo de CadnaA:




**Fig. 9**: Buscador de direcciones. El MRO muestra en pantalla las calles. El usuario puede mostrar una dirección en pantalla mediante el botón correspondiente.

## CONCLUSIONES

La automatización de tareas mediante scripts aplicados a software de simulación acústica demuestra ser una potente herramienta para el usuario, aportando una nueva dimensión en lo referente a la reducción de costes y al aumento de la calidad del trabajo realizado. Aplicado a la presentación de mapas de ruido online, aporta una herramienta flexible, rápida y útil y fácilmente actualizable que cumple los requisitos establecidos por la legislación vigente en lo relativo la distribución de los resultados entre la población.

## REFERENCIAS

1. Directiva 2015/996 de la Comisión Europea, Métodos de Evaluación Comunes de acuerdo con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2015)

2. Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre Evaluación y Gestión del Ruido Ambiental (2002)

3. Sistema de Información sobre Contaminzación Acústica (SICA), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015) – www.sicaweb.cedex.es

4. Information about *Lua* language: http://www.lua.org/docs.html

5. DataKustik GmbH, "CadnaA – Software for Environmental Noise", www.datakustik.com

6. “Large-Scale Calculation of Possible Locations for Specific Wind Turbines under Consideration of Noise Limits”. Fabian Probst, Dr. Wolfgang Probst, Bernd Huber – Internoise Innsbruck, Austria (2013)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CASO PRÁCTICO DE ELABORACIÓN DE MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO EN MUNICIPIOS DE PEQUEÑO TAMAÑO ENGLOBADOS EN UN ÚNICO PROYECTO

PACS: 43.50.Sr

Espinel Valdivieso, Ana Esther; Riesco García, Jose Ignacio; Ausejo Prieto, Miguel; Herranz Pedriza, Sara; Sánchez. Gozalo, Gema; Rodriguez Pérez, Mari Paz; De la Cruz Lecanda, Azucena.
AUDIOTEC INGENIERÍA ACÚSTICA.
C/ Juanelo Turriano, 4. Parque Tecnológico de Boecillo. 47151. Boecillo. Valladolid.
http://www.audiotec.es/ Tlf: 983 36 13 26
E-mail: idi@audiotec.es

## ABSTRACT

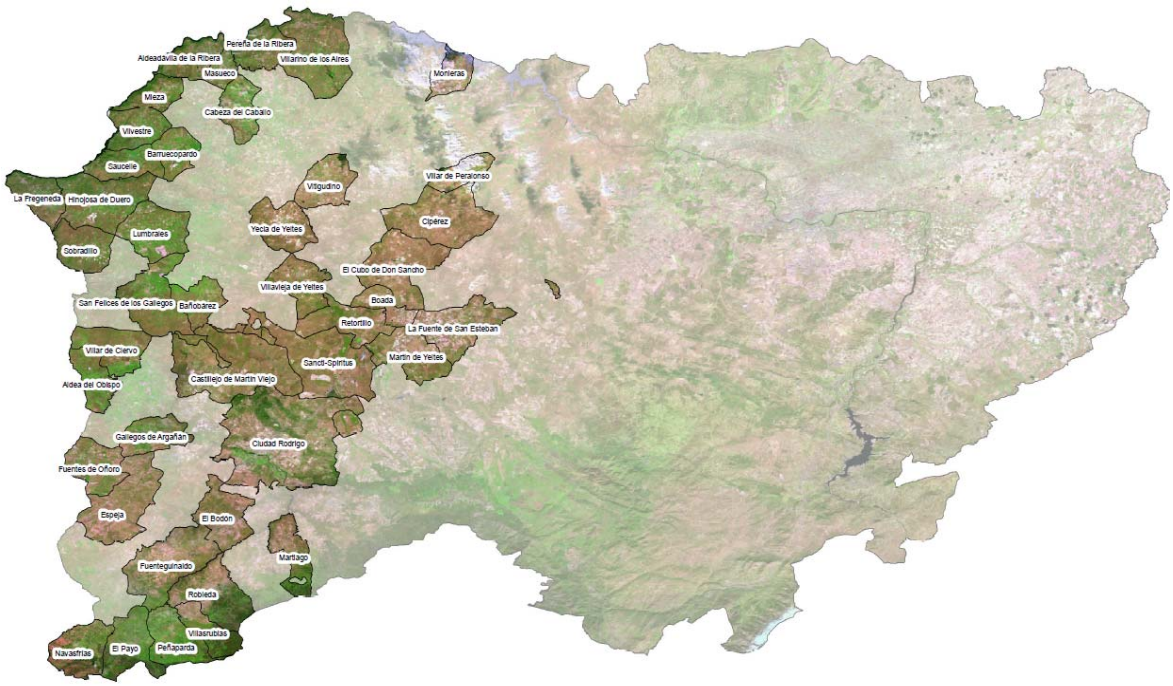
The national acoustic legislation in Spain require, for agglomerations which have more than 100.000 habitants, to make noise maps. Some regions in Spain (Comunidades Autónomas) have elaborated more specific legislation based on the legislation make for national authorities and It requires noise maps for locations that have less habitants than the national legislation We explain including on the requirements of noise maps populations locations that have less population, for example, Castilla y León required those maps for populations that have more than 20.000 habitants or País Vasco that required the noise maps to more than 10.000 habitants populations. Nevertheless, only on acoustics areas where authorities can probe They are breaking the law of acoustic quality They have to do the noise maps instead of its population but in other cases It will not be required (populations which have less habitants).
In this document, We record the results of 42 strategic noise maps made in an only project, about towns which average size are less than 10.000 habitants. We analyze how the size of towns and other interesting facts which can influence on noise contamination. The document even expond the economic, logistic, and another benefits that the noise cartography of this category of towns provides on population and town administrators.

## RESUMEN

La legislación estatal en materia de acústica exige la elaboración de mapas estratégicos de ruido en aglomeraciones de más de 100.000 habitantes. Algunas Comunidades Autónomas han desarrollado la legislación básica estatal y requieren mapas de ruido a municipios de menor población, como en Castilla y León, a municipios de más de 20.000 habitantes o el País Vasco, a municipios de más de 10.000 habitantes. Sin embargo, salvo en áreas acústicas en las que se compruebe el incumplimiento de los requisitos de calidad acústica, los mapas estratégicos de ruido no son una herramienta exigida en municipios de pequeño tamaño.
En este trabajo se exponen los resultados de la elaboración de 42 mapas estratégicos de ruido, englobados en un único proyecto, sobre municipios cuyo tamaño medio es menor de 1000 habitantes. Se analiza cómo influye el tamaño del municipio y otras variables de interés en la afección por ruido, y se estudian los beneficios económicos y logísticos, entre otros, que aporta el cartografiado del ruido de esta tipología de municipios sobre la gestión municipal y sobre el ciudadano.

## 1.- INTRODUCCIÓN

En el primer cuatrimestre de 2015 AUDIOTEC ha elaborado de forma simultánea 42 mapas de ruido de municipios pertenecientes a la provincia de Salamanca, en la zona fronteriza entre España y Portugal. Los municipios cartografiados se muestran en la siguiente figura:




La superficie total de los 42 municipios objeto de estudio es aproximadamente de unos 2.828 $km^2$ y su población total de 37.079 habitantes.

El trabajo realizado presenta la singularidad de que el área cartografiada abarca una extensión de terreno muy grande y la densidad de población es muy baja. Además, el servicio se ha realizado en un plazo de tres meses. Por estos motivos, para afrontarlo se hubo de adaptar la metodología comúnmente empleada en la elaboración de mapas estratégicos de ruido de aglomeraciones a estas particularidades.

En la siguiente tabla se detallan los municipios cartografiados y se indica la superficie de cada uno de ellos, así como su población. Ambos datos se han obtenido de fuentes de la Diputación de Salamanca.

| Municipio | Superficie (Km²) | Población | Mancomunidad |
|---|---|---|---|
| Aldea del Obispo | 42 | 332 | Puente La Unión |
| Aldeadávila de la Ribera | 46 | 1324 | Centro Duero |
| Bañobárez | 50 | 324 | Comarca del Abadengo |
| Barruecopardo | 38 | 519 | Centro Duero |
| Boada | 30 | 300 | Las Dehesas / Campo Charro |
| Bodón, El | 61 | 301 | Alto Agueda |
| Cabeza del Caballo | 45 | 357 | Centro Duero |
| Castillejo de Martín Viejo | 156 | 242 | Puente La Unión |
| Cipérez | 105 | 296 | Vitigudino / Campo Charro |
| Ciudad Rodrigo | 240 | 13503 | Riberas Agueda, Yeltes y Agadón |
| Cubo de Don Sancho, El | 91 | 464 | Vitigudino |
| Espeja | 98 | 261 | Puente La Unión |
| Fregeneda, La | 45 | 404 | Comarca del Abadengo |
| Fuente de San Esteban, La | 77 | 1413 | Las Dehesas / Campo Charro |
| Fuenteguinaldo | 102 | 714 | Alto Agueda / Aguas Agueda-Azaba |
| Fuentes de Oñoro | 57 | 1353 | Puente La Unión |
| Gallegos de Argañán | 47 | 308 | Puente La Unión |
| Hinojosa de Duero | 93 | 730 | Comarca del Abadengo |
| Lumbrales | 70 | 1771 | Comarca del Abadengo |
| Martiago | 47 | 287 | Alto Agueda / Burguillos |
| Martín de Yeltes | 63 | 449 | Las Dehesas / Campo Charro |
| Masueco | 20 | 353 | Centro Duero |
| Mieza | 35 | 240 | Centro Duero |
| Monleras | 33 | 257 | Cabeza de Horno / Comarca de Ledesma |
| Navasfrías | 60 | 485 | Alto Agueda |
| Payo, El | 62 | 376 | Alto Agueda |
| Peñaparda | 60 | 391 | Alto Agueda |
| Pereña de la Ribera | 49 | 413 | Arribes del Duero |
| Retortillo | 65 | 256 | Las Dehesas / Campo Charro |
| Robleda | 79 | 488 | Alto Agueda |
| San Felices de los Gallegos | 81 | 474 | Comarca del Abadengo |
| Sancti-Spíritus | 142 | 862 | Riberas Agueda, Yeltes y Agadón |
| Saucelle | 46 | 350 | Centro Duero |
| Sobradillo | 54 | 255 | Comarca del Abadengo |
| Villar de Ciervo | 57 | 291 | Puente La Unión |
| Villar de Peralonso | 32 | 268 | Cabeza de Horno / Comarca de Ledesma |
| Villarino de los Aires | 103 | 879 | Arribes del Duero |
| Villasrubias | 40 | 305 | Alto Agueda |
| Villavieja de Yeltes | 51 | 912 | Vitigudino / Yeltes |
| Vilvestre | 47 | 468 | Centro Duero |
| Vitigudino | 52 | 2819 | Cabeza de Horno |
| Yecla de Yeltes | 57 | 285 | Vitigudino / Yeltes |
| *Total* | ***2828*** | ***37079*** | |

## 2.- OBJETIVO

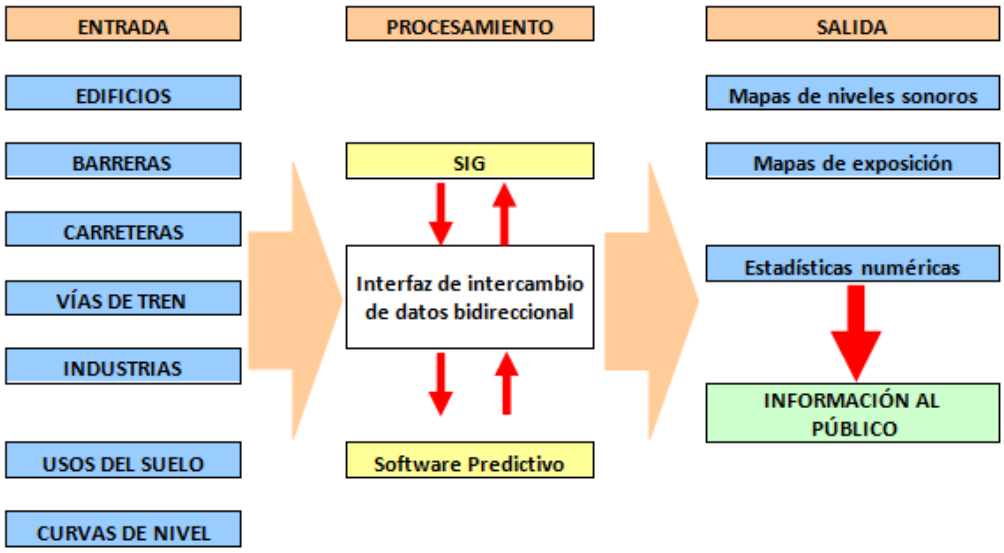
Con la presente comunicación se pretende exponer el resultado de los trabajos y la metodología empleada por AUDIOTEC en la elaboración de 42 mapas estratégicos de ruido sobre municipios de pequeño tamaño realizados de forma simultánea.

Este trabajo ha permitido, por una parte, desarrollar una metodología para la elaboración de Mapas Estratégicos de Ruido adaptada a las características singulares de núcleos urbanos de pequeño tamaño y población y, por otra parte, valorar los beneficios, dificultades encontradas y líneas futuras de trabajo.

## 3.- METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO

La metodología operativa que se ha utilizado para la elaboración de los mapas de ruido no difiere de la habitualmente empleada por Audiotec en los mapas de ruido de aglomeraciones de mayor tamaño.

El esquema general seguido ha sido el que se presenta a continuación:




A diferencia de los municipios de gran tamaño, cuyos Ayuntamientos tienen una amplia estructura organizativa y es habitual disponer de información cartográfica, urbanística, de movilidad urbana y de ruido ambiental, en los municipios de pequeño tamaño lo habitual es no disponer de ninguna información de utilidad para afrontar el cartografiado del ruido.

Los principales problemas con los que se ha encontrado Audiotec respecto de la recopilación de información de partida para la elaboración de los mapas han sido los siguientes:

- Información del planeamiento general no actualizada y en muchas ocasiones sin digitalizar.
- Cartografía municipal no disponible.
- Falta de información de aforos de tráfico de las calles de los municipios.
- Ausencia de información relativa a ruido ambiental: inventario de actividades ruidosas, denuncias por ruido, etc.

Para paliar este déficit de información de partida se ha recurrido a otras fuentes de documentación de Administraciones Públicas como la Diputación Provincial de Salamanca, la Junta de Castilla y León y otras Administraciones y Empresas Públicas.

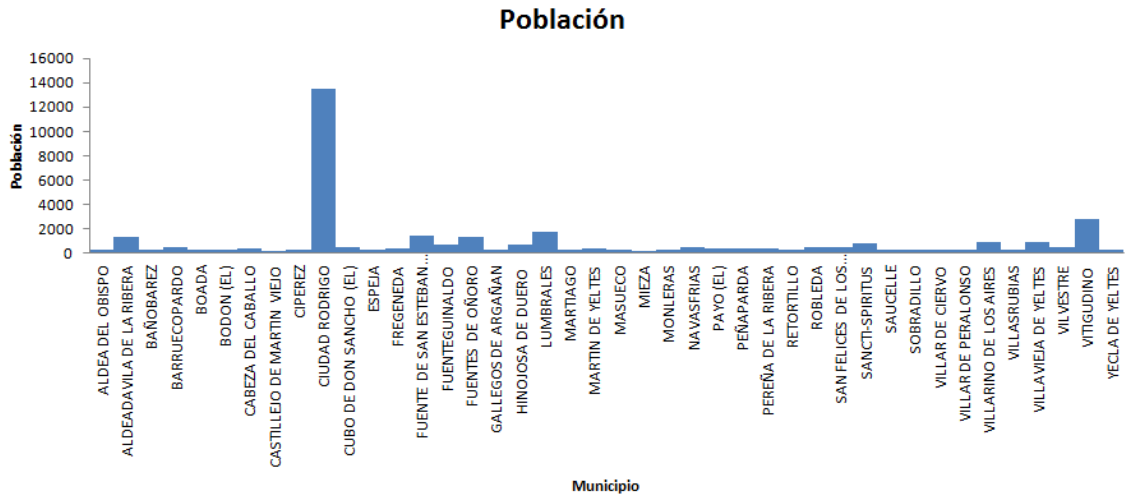
La información necesaria para la elaboración de las bases de datos básicas de los mapas de ruido se ha completado potenciando el trabajo de campo tanto para la caracterización de los emisores acústicos como para la revisión de la información recopilada. Los niveles de tráfico rodado en las infraestructuras de transporte del ámbito de estudio son por lo general bajos. Para garantizar que la estimación de las intensidades de tráfico son correctas ha sido preciso que en el trabajo de campo se profundizara tanto en puntos de conteo como en el espectro temporal a caracterizar. En los modelos acústicos se ha introducido información de 2202 tramos de red viaria, de los cuales 1895 se han caracterizado a partir del trabajo de campo y los restantes 307 se han obtenido de aforos oficiales de tráfico. La caracterización el tráfico ferroviario se ha conseguido a partir de la información obtenida de los 24 tramos existentes.

Como complemento al trabajo de campo para la caracterización de los emisores acústicos, se han llevado a cabo mediciones de ruido en 284 puntos distribuidos en los 42 municipios según criterios de población, longitud y relevancia de la trama viaria y presencia de actividad industrial.

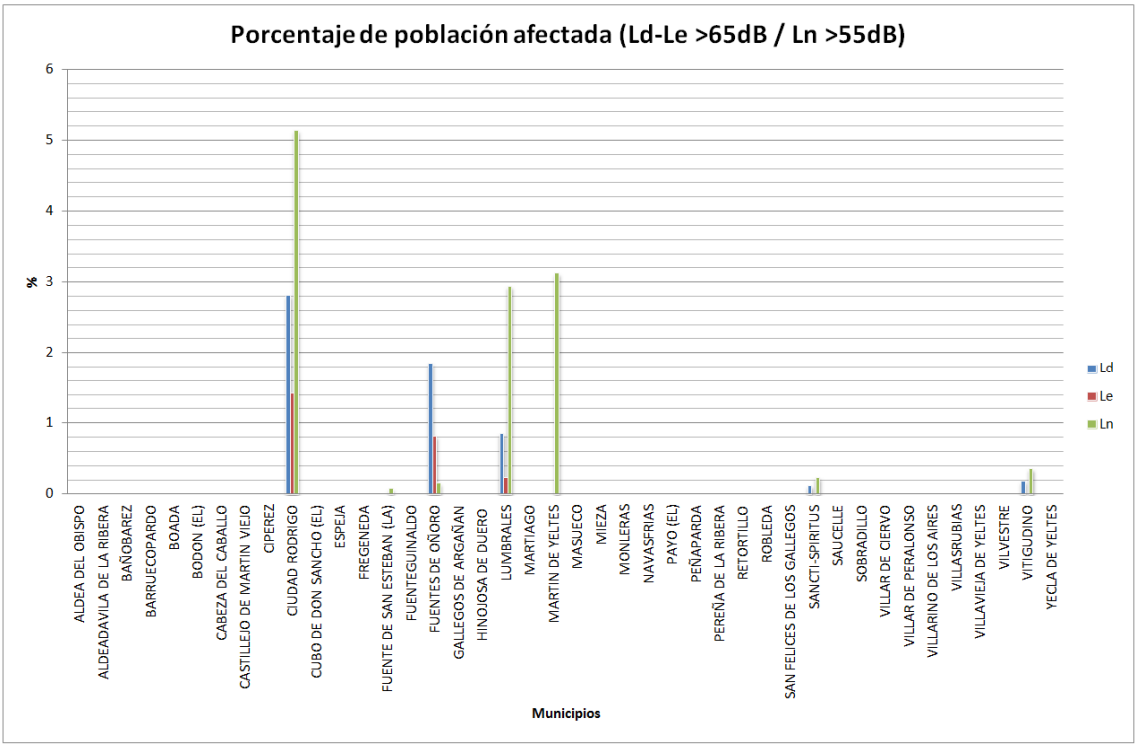
El resto de la metodología empleada para la elaboración de los mapas estratégicos de ruido ha sido similar a la empleada por Audiotec en proyectos similares.

## 4.- ANÁLISIS DE LA POBLACIÓN AFECTADA POR RUIDO

La población de los municipios cartografiados se distribuye de manera no uniforme, ya que tan solo Ciudad Rodrigo concentra casi el 40% de la población global. El segundo municipio más poblado es Vitigudino, con una población cercana a los 3000 habitantes, mientras que la población media del resto de los municipios está en torno a los 500 habitantes.




Los porcentajes de población afectada por ruido para las distintas poblaciones se presenta en la figura siguiente:

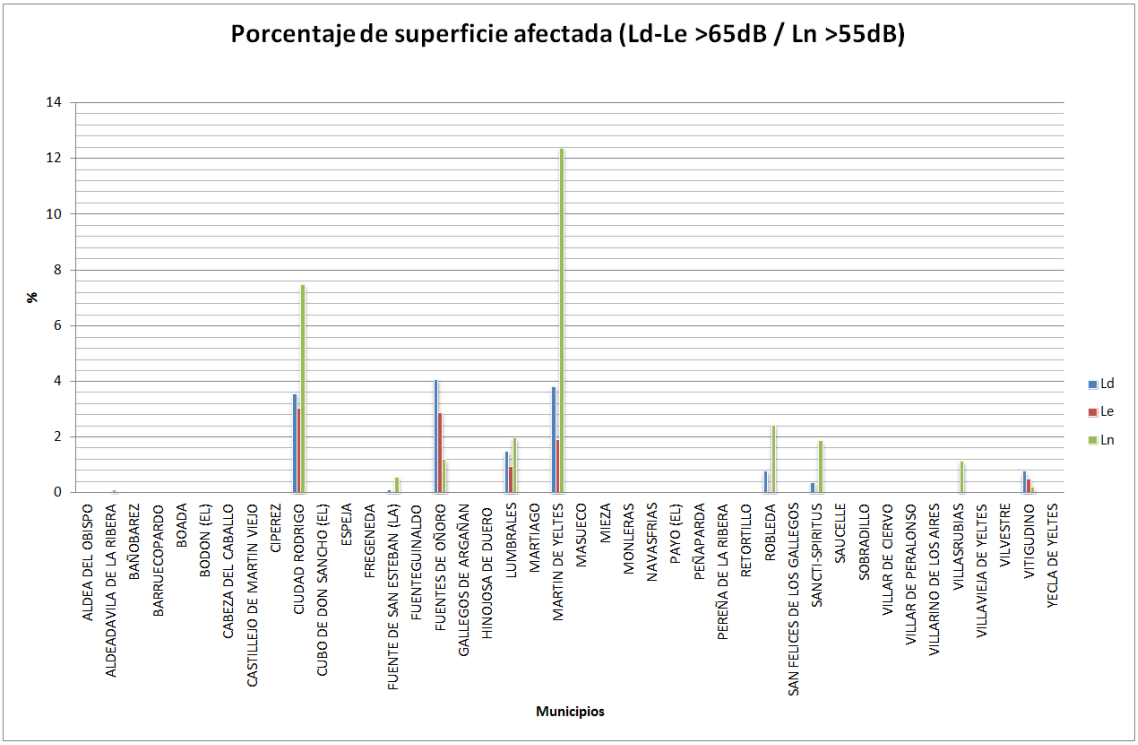



A partir de estos datos se deducen las siguientes conclusiones:

- Hay una relación directamente proporcional entre la población total de cada municipio y el % de población afectada por ruido.
- El municipio de mayor población es Ciudad Rodrigo, y destaca sobre los demás porque su población afectada por ruido supera el 5%, que pese a ser un valor bajo en comparación con aglomeraciones de mayor tamaño, es elevado si se compara con el resto de los 41 municipios cartografiados.
- De los 42 municipios cartografiados, tan solo hay 7 que tienen población afectada por ruido (Ld>65 dB; Le>65 dB; Ln>55 dB; Lden>66 dB), siendo la media de la población de estos municipios de 700 habitantes.

## 5.- ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE AFECTADA POR RUIDO

En la evaluación de la superficie afectada por ruido de los 42 municipios cartografiados se observa que el peso de variables como la población total o la población afectada, pese a tener correlación, no es tan directa como lo es en aglomeraciones de mayor tamaño. Si tiene, sin embargo, una mayor incidencia sobre la superficie afectada por ruido la proximidad de grandes infraestructuras de transporte viario y ferroviario a los municipios, como ocurre en los casos de Martín de Yeltes o Fuentes de Oñoro.




## 6.- CONCLUSIONES

La elaboración en simultáneo de 42 MER de pequeño tamaño en la provincia de Salamanca por parte de AUDIOTEC ha permitido desarrollar una metodología operativa que, dadas las características de los municipios, difiere en algunos puntos de la que habitualmente se emplea en aglomeraciones de mayor tamaño. La dificultad para recopilar información actualizada y en los formatos adecuados hace que haya que potenciar el trabajo de campo para la caracterización de los emisores acústicos y para completar las bases de datos básicas.

Con la elaboración de los MER se ha puesto a disposición de los municipios una herramienta que permite la evaluación global de la exposición a la contaminación acústica, realizar predicciones globales para dicha zona, y posibilitar la adopción fundada de planes de acción en materia de contaminación acústica, supone otras ventajas adicionales

Otras ventajas adicionales que supone para estos municipios el disponer de un mapa de ruido y de la correspondiente zonificación acústica de un municipio son las siguientes:

- El marco normativo vigente dicta que en la planificación territorial y en los instrumentos de planeamiento urbanístico, tanto a nivel general, como de desarrollo, se debe incluir la zonificación acústica del territorio en áreas acústicas.
- Conocimiento del grado de contaminación acústica del suelo urbanizable del municipio y previsión de si serán necesarias medidas preventivas o correctivas para su desarrollo, facilitando así las exigencias que establece el Artículo 7 de la Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León.
- Disposición de información de los niveles sonoros ambientales del suelo urbano del municipio, de manera que se cuente con la información necesaria para evaluar el ruido de las parcelas en donde esté previsto conceder nuevas licencias de construcción, permitiendo el ahorro a los vecinos del trámite de elaboración de un Estudio Acústico para dar cumplimiento al Artículo 28 de la Ley 5/2009.

Por consiguiente, con la elaboración de mapas estratégicos de ruido en diversos municipios de la provincia de Salamanca la Diputación de Salamanca mejora la respuesta técnica de las diputaciones respecto de sus atribuciones competenciales como de las correspondientes a los Municipios en materia de ruido ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA


[1] DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

[2] Riesco García, Jose Ignacio; Herranz Pedriza, Sara; Sánchez. Gozalo, Gema; Sendín Martín, Alejandro; Pérez Blázquez, Mayte; Ausejo Prieto, Miguel.. OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS PARA LA REALIZACIÓN DE UN MER DE 2ª RONDA. TECNIACUSTICA 2014, Valladolid, España.

[3] Riesco García, Jose Ignacio; Herranz Pedriza, Sara; Sendín Martín, Alejandro; Sanchez. Gozalo, Gema; Lora Espinel, Marco. *ESTUDIO Y COMPARATIVA DE DOCE MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO REALIZADOS EN CASTILLA Y LEÓN*. TECNIACUSTICA 2013, Valladolid, España.

[4] Shilton, Simon; Jones, Nigel; Hepworth, Peter; Stimac, Alan4; Ausejo, Miguel. *GESTIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE GRANDES MAPAS DE RUIDO.* TECNIACUSTICA 2013, Valladolid, España.

[5] Riesco García, Jose Ignacio; Pérez Blazquez, Mayte; Lora Espinel, Marco. *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES DE ACCIÓN EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN MUNICIPIOS DE MENOS DE 100.000 HABITANTES*. TECNIACUSTICA 2013, Valladolid, España.

[6] Riesco García, Jose Ignacio; Arenaz Gombáu, Ángel; Espinel Valdivieso, Ana E. *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR LOS NIVELES SONOROS AMBIENTALES EN PARCELAS DONDE SE UBICARÁN EDIFICIOS*. TECNIACUSTICA 2013, Valladolid, España.

[7] Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido

[8] RD 1513/2005, de 16 de noviembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental

[9] RD 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

[10] Directrices para la reducción del ruido causado por el tráfico rodado. Proyecto europeo SMILE (2004)

[11] Ordenación y desarrollo del territorio en Castilla y León. Análisis y Valoraciones. Juan Ignacio Plaza Gutiérrez. Universidad de Salamanca. 2011.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUÍDO DE 2ª FASE NA CONCESSÃO BRISA

PACS: 43.50.Rq

Braga, Margarida[1]; Claro, Teresa[2]
[1] Brisa Engenharia e Gestão, S.A.
Quinta da Torre da Aguilha – Edifício Brisa, 2785-599 São Domingos de Rana, Portugal
Tel.:+351 21 444 85 00, Fax: +351 21 005 82 97, email: maria.braga@brisa.pt
[2] ECOserviços – Gestão de Sistemas Ecológicos, Lda.
Rua D. Luís I, n.º 19, 2º, 1200-149 Lisboa, Portugal
Tel.:+351 21 394 41 30, Fax: +351 21 394 41 69, email: tclaro@ecoservicos.pt

**ABSTRACT**

Brisa's Concession comprises a 1096 km network of motorways, which include about 740 km of Major Roads, approximately 600 km of which are managed under the 1st round of the implementation of the Directive 2002/49/EC and 140 km under the 2nd round. This paper presents the methodology adopted under the 2nd phase of implementation of strategic noise maps, its developments and the main results obtained. It establishes also a comparison between the 1st and 2nd round through indicators generated from the strategic maps data, emphasizing the today's challenges.

**Keywords:** Strategic noise mapping, road noise, indicators

**RESUMO**

A Concessão Brisa integra uma rede de auto-estradas com uma extensão global de 1096 km, que inclui cerca de 740 km de Grandes Infra-estruturas de Transporte Rodoviário, dos quais aproximadamente 600 km foram abrangidos pela 1ª fase de implementação da Directiva 2002/49/CE e 140 km pela 2ª fase. Neste artigo apresenta-se a metodologia adoptada na elaboração dos mapas estratégicos de ruído de 2ª fase, os desenvolvimentos ocorridos e os resultados obtidos. Recorrendo a indicadores gerados a partir dos dados dos mapas estratégicos, procede-se, ainda, à comparação do panorama da 1ª fase com o da 2ª fase e perscrutam-se os actuais desafios.

**Palavras-chave:** Mapas estratégicos de ruído, ruído de tráfego rodoviário, indicadores

## 1. CONCESSÃO BRISA E A 2ª FASE DE IMPLEMENTAÇÃO DA DIRECTIVA

A Concessão Brisa integra uma rede de 11 auto-estradas, num total de 1096 km (ver Figura 1a).

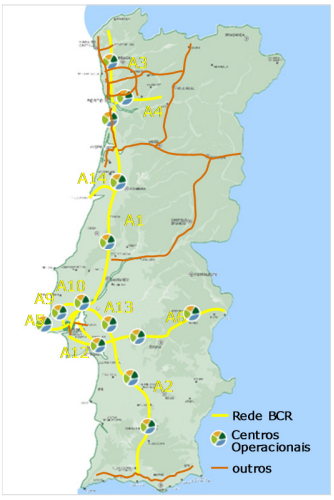



Figura 1a. Concessão Brisa

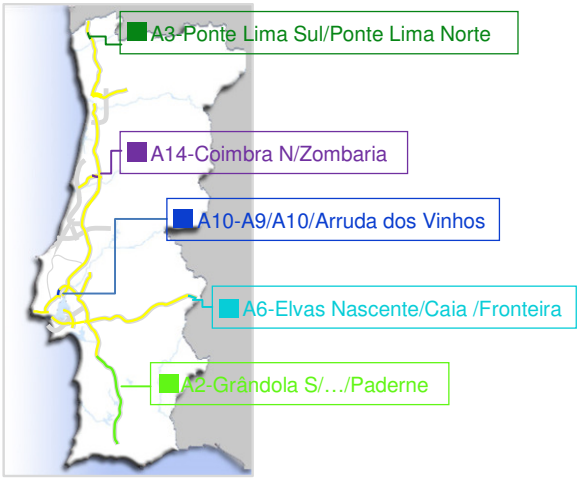



Figura 1b. Auto-estradas abrangidas pela 2ª fase de implementação da Directiva 2002/49/CE

Relativamente à Concessão BRISA, uma imagem da sua dimensão pode ser traduzida pelos seguintes dados: 1096 km em serviço, dos quais cerca de 804 km são de 2x2 vias, 276 km são de 2x3 vias, 16 km são de 2x4 vias, perfazendo 4996 km de vias. Ao longo da rede principal existem 14 Centros Operacionais, 25 áreas de serviço e 97 praças de portagem.

Na 2ª fase de elaboração dos Mapas Estratégicos de Ruído (MER) foram abrangidas as auto-estradas com mais de três milhões e menos de 6 milhões de passagens de veículos por ano, designadamente (ver Figura 1b):

- A2 – Sublanços Grândola Sul / Aljustrel / Castro Verde / Almodôvar / São Bartolomeu de Messines / A22 (Paderne) (120,4 km)
- A3 - Ponte de Lima Sul / Ponte de Lima Norte (0,8 km)
- A6 - Sublanços Elvas Nascente / Caia / Fronteira do Caia (7,1 km)
- A10 – Sublanço A9/A10 / Arruda dos Vinhos (6,9 km)
- A14 – Sublanço Coimbra Norte / Zombaria (1,1 km)

Estas auto-estradas (de ora em diante designadas AE-2ª fase) distribuem-se de Norte a Sul do país e do litoral para o interior, conforme se pode verificar na Figura 1b. Apesar de atravessarem regiões com características muito diferentes, todas estas auto-estradas têm em comum o facto de confinarem com zonas com uma ocupação humana do território caracterizada por baixas densidades populacionais e por povoações dispersas e pouco povoadas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Enquadramento Legal

A principal legislação que enquadrou a elaboração dos MER é constituída por: **Decreto-lei n.º 146/2006, de 31 de Julho** [1], rectificado pela Declaração de Rectificação n.º 57/2006, de 31 de Agosto, e o Decreto-lei n.º 9/2007 [2], de 17 de Janeiro, rectificado pela Declaração de Rectificação n.º 18/2007, de 16 de Março, e com as alterações introduzidas pelo Decreto-lei n.º 278/2007, de 1 de Agosto.

Os principais aspectos da referida legislação aplicáveis às infra-estruturas de transporte rodoviário encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Principais aspectos da legislação aplicáveis às infra-estruturas de transporte rodoviário

<table>
<tr><td colspan="3">Decreto-lei n.º 146/2006, de 31 de Julho (procede à transposição da Directiva Europeia 2002/49/CE)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Obrigatoriedade de elaboração de MER e de planos de acção (PA) para as Grandes Infra-estruturas de Transporte Rodoviário (GIT):<br>• 1ª fase, relativa ao ano civil de 2006, abrange as GIT com mais de 6 milhões de passagens de veículos por ano e<br>• 2ª fase, relativa ao ano civil de 2011, abrange as GIT com mais de 3 milhões de passagens de veículos por ano</td></tr>
<tr><td colspan="3">Os MER e PA são disponibilizados e divulgados junto do público, havendo mesmo uma consulta pública no caso dos PA</td></tr>
<tr><td colspan="3">Decreto-lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro – Regulamento Geral de Ruído</td></tr>
<tr><td>Aspectos</td><td>Indicadores</td><td>Limites</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Estabelece como principais os seguintes indicadores de ruído:</td><td rowspan="3">$L_n$ – Indicador de ruído do período nocturno (das 23 às 7h)</td><td>45 dB(A) – Zonas sensíveis</td></tr>
<tr><td>53 dB(A) – Zonas não classificadas</td></tr>
<tr><td>55 dB(A) – Zonas mistas<br>(limite estabelecido para as proximidades de uma GIT)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">$L_{den}$ – Indicador de ruído global<br>$L_{den}=10\times log\frac{1}{24}\left[13\times 10^{\frac{L_d}{10}}+3\times 10^{\frac{L_e+5}{10}}+8\times 10^{\frac{L_n+10}{10}}\right]$</td><td>55 dB(A) – Zonas sensíveis</td></tr>
<tr><td>63 dB(A) – Zonas não classificadas</td></tr>
<tr><td>65 dB(A) – Zonas mistas<br>(limite estabelecido para as proximidades de uma GIT)</td></tr>
</table>

## 2.2 Reconhecimento de Campo e Recolha de Dados

Na elaboração dos MER utilizou-se cartografia 3D, a qual se encontrava à escala 1/10 000 e incidia numa faixa de 350 m para cada um dos lados das AE–2ª fase. Primeiramente, procedeu-se à caracterização da envolvente do traçado, através do reconhecimento de campo no qual foram caracterizados e fotografados os vários receptores sensíveis (edifícios habitacionais, escolares, hospitalares ou similares ou espaços de lazer, com utilização humana) existentes. A referida caracterização englobou vários aspectos, relevando-se o tipo de ocupação e o número de pisos das diversas edificações cartografadas. Esta actividade, apesar de morosa, é imprescindível dado que numa fase posterior do estudo se irá alocar a população a cada edifício, com vista a calcular a população exposta às várias classes de níveis de ruído

Paralelamente foi efectuada a recolha de diversos dados, tais como dados meteorológicos (humidade relativa do ar, velocidade do vento e a temperatura do ar), dados de tráfego e dados sobre população e uso do solo.

Por forma a caracterizar a via, de acordo com a realidade existente, enquanto fonte sonora, foram utilizados os dados de tráfego referentes ao ano de 2011 (considerando-se que o tráfego se distribui igualmente pelos dois sentidos), a velocidade, o tipo de pavimento, o perfil longitudinal da via e a fluidez do tráfego. Regra geral, os sublanços das AE-2ª fase apresentam um perfil de 2x2, variando a largura da plataforma entre 22,6 m e 36,50 m, e o tráfego anual acumulado entre 3 milhões e 5,5 milhões de veículos.

Para a caracterização dos níveis de ruído ambiente exterior existentes e posterior validação dos modelos criados, foram realizadas medições de ruído, *in situ*, respeitando as normas e regulamentação vigentes, com amostragens contínuas, com uma duração mínima de 48h. As medições de ruído foram efectuadas em locais com influência predominante do ruído proveniente da auto-estrada e onde se verifica a ausência de obstáculos entre a fonte e o receptor.

## 2.3 Inputs no Programa de Cálculo, Verificação, Cálculo e Validação do Modelo

Para a elaboração dos MER recorreu-se ao programa de cálculo automático CadnaA V. 4.0 e foram considerados dois tipos diferentes de dados de input: os dados geométricos e as fontes sonoras. O input dos dados geométricos no software de cálculo de modo a originar um modelo válido foi efectuado através da importação directa destes elementos pré-digitalizados em formato CAD, os quais estavam organizados em várias “layers” diferenciadas.

Todo o edificado existente na área em análise foi inserido no modelo assim como todas as barreiras acústicas já implementadas que, à data, perfaziam um total de cerca de 10 km e mais de 14,2 mil $m^2$. De modo a evitar modelações da realidade deficientes ou que apresentem erros foram efectuadas várias verificações geométricas da modelação obtida (ver figuras 2a e 2b).

Para o desenvolvimento dos cálculos do MER foi definida uma malha de cálculo regular de pontos receptores, com 5 m por 5 m, a 4 m de altura do solo. Após o desenvolvimento dos cálculos e definida a 1ª versão do modelo de cálculo, foi efectuada uma análise dos resultados e realizada a respectiva calibração, tendo em conta as características do ruído estimadas em certos pontos.

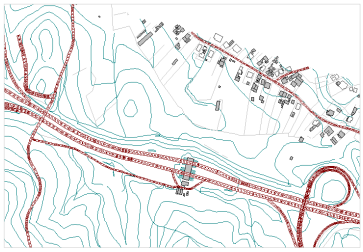


Figura 2a. Modelo criado

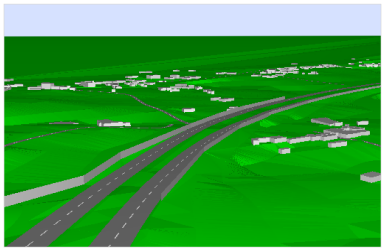


Figura 2b. Vista 3D

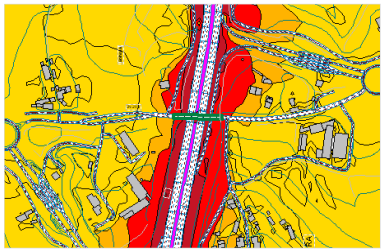


Figura 2c. Mapa de níveis sonoros

2.4 Resultado do Mapa Estratégico de Ruído

Após o desenvolvimento de todos os cálculos e validações necessárias procedeu-se, então, à elaboração do MER para as AE-2ª fase, tendo estes compreendidos dois tipos de mapas: Mapas de níveis sonoros (ver Figura 2c) e mapa de exposição ao ruído.

Os mapas de níveis sonoros consistem na representação gráfica de indicadores de ruído, reportando-se à situação existente para o Indicador de Ruído $L_{den}$ (diurno-entardecer-nocturno), Indicador de Ruído $L_n$ (nocturno), Indicador de Ruído $L_d$ (diurno) e Indicador de Ruído $L_e$ (entardecer), expresso em dB(A), sendo possível identificar os tipos de fonte sonora considerada, o tipo de avaliação utilizada, a toponímia dos principais aglomerados populacionais, o limite geográfico das freguesias atravessadas.

Os mapas de exposição ao ruído, permitem determinar a população exposta a cada classe de Leq, em dB(A), tendo para o efeito recorrido à Base Geográfica de Referenciação de Informação do INE, que disponibiliza os dados da população residente, por subsecção estatística, relativos ao Censos 2011. O cálculo da população a alocar a cada edifício, baseou-se na sobreposição das bases SIG dos edifícios habitacionais com a base estatística desse mesmo lugar e na utilização do valor da sua densidade populacional característica.

A determinação da população exposta às várias classes de níveis sonoros teve em conta que a população residente em cada edifício (calculada de acordo com as premissas anteriores) se encontrava exposta ao nível sonoro máximo incidente na fachada do respectivo edifício.

## 3. RESULTADOS E SUA COMPARAÇÃO COM OS OBTIDOS NA 1ª FASE

Os MER associados a informação sobre a população residente nas zonas mapeadas, permitem gerar indicadores de grande relevância para evidenciar a dimensão do impacte da infra-estrutura de transporte rodoviário sobre o ambiente sonoro, escalonar as prioridades de intervenção e medir os benefícios da implementação de uma determinada medida de redução de ruído.

No presente artigo procede-se à apresentação dos resultados dos MER de 2ª fase e à sua comparação com os de 1ª fase, sendo que a referida 1ª fase envolveu as seguintes auto-estradas com mais de 6 milhões de passagens de veículos por ano: A1 – Auto-estrada do Norte, desde Sacavém até Sto. Ovídio (297,4 km), A2 – Auto-estrada do Sul desde Almada até Grândola Sul (114,4 km), A3 – Auto-estrada Porto/Valença, desde o Porto até Braga Sul (42,5 km), A4 – Auto-estrada Porto/Amarante, desde Águas Santas até Amarante (51,3 km), A5 – Auto-estrada da Costa do Estoril, desde Lisboa até Cascais (25 km), A9 – Circular Regional Exterior de Lisboa, desde o Estádio Nacional até Alverca (34,4 km), A12 – Auto-estrada Setúbal/Montijo, desde Setúbal até ao Montijo (24,8 km), A14 – Auto-estrada Figueira da Foz/Coimbra, desde a Figueira da Foz até Santa Eulália (12 km).

As auto-estradas abrangidas na 1ª fase (de ora em diante designadas AE-1ª fase) atravessam desde zonas com grandes aglomerações densamente povoadas até zonas de povoamento disperso, destacando-se que, à excepção da A14, se tratam de auto-estradas maioritariamente associadas a deslocações nas duas principais áreas metropolitanas de Portugal, Lisboa e Porto.

A apresentação, análise e comparação de resultados recorrerá aos seguintes indicadores (ver Figuras 3, 4 e 5): população exposta a diferentes níveis de ruído, por intervalos de $L_{den}$ e de $L_n$ e por quilómetro, população exposta a níveis de ruído, $L_{den}$ e $L_n$, superiores aos legislados, por quilómetro, e distância média da isófona ao eixo da via. Nas Figuras 3 e 4 apresenta-se uma imagem de pormenor para as AE-2ª fase com gráficos específicos com uma escala maior.

<u>População exposta a diferentes níveis de ruído, por intervalos de $L_{den}$ e de $L_n$ e por quilómetro</u>

A análise da Figura 3 permite verificar que, à medida que os níveis de $L_{den}$ e de $L_n$ aumentam a população exposta diminui e, no caso das AE-2ª fase, não existe população exposta a $L_{den}$ superior a 75 dB(A) e a $L_n$ superior a 70 dB(A). Acresce que em todos os intervalos de níveis de ruído, quer de $L_{den}$ quer de $L_n$, existe mais população exposta por quilómetro na envolvente das AE-1ª fase, com uma única excepção da A3 - Ponte Lima Sul/Ponte Lima Norte que tem mais população exposta que a A12, quando considerado o intervalo 55-60 dB(A) de $L_{den}$, e que a A12 e que a A14 - Figueira da Foz/…/Santa Eulália, no caso do intervalo 45-50 d(BA) de $L_n$.

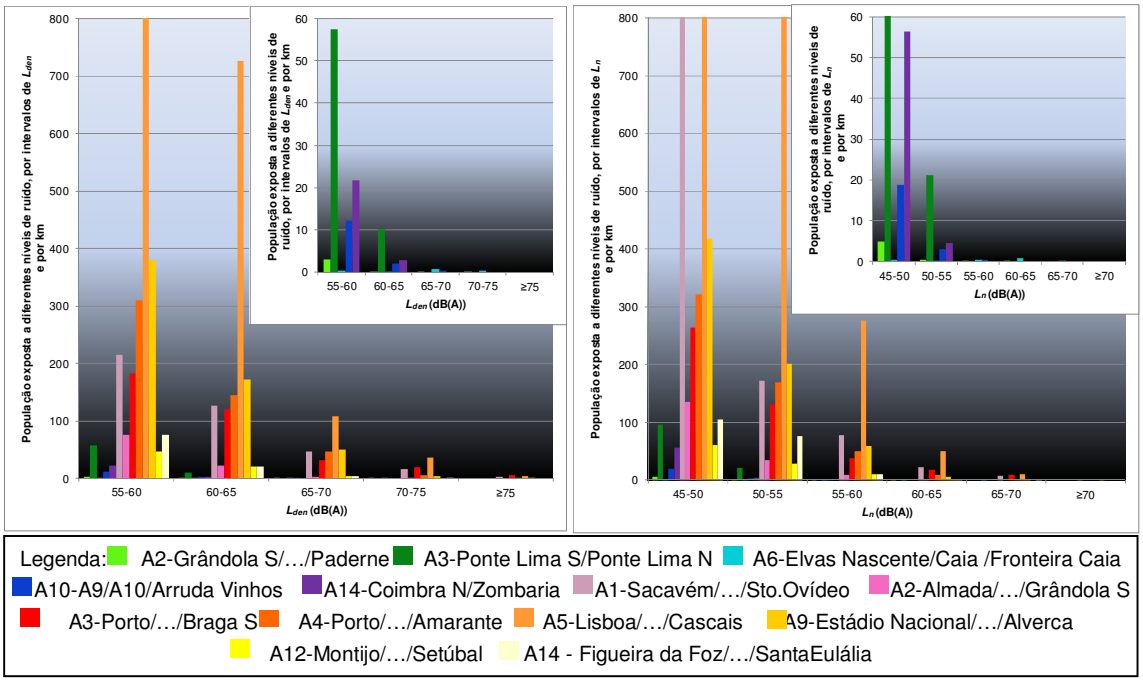



Figura 3. População exposta a diferentes níveis de ruído, por intervalos de $L_{den}$ e de $L_n$ e por quilómetro

Nas AE-2ª fase, a população exposta a diferentes níveis de $L_{den}$ e de $L_n$, por quilómetro, tem uma dimensão reduzida, adquirindo apenas alguma expressão no caso da A3 - Ponte Lima Sul/Ponte Lima Norte e da A14 – Zombaria/Coimbra Norte para níveis de $L_{den}$ compreendidos entre 55 e 60 dB(A) e de $L_n$ entre 45 e 50 dB(A).

População exposta a níveis de ruído, $L_{den}$ e $L_n$, superiores aos legislados, por quilómetro

A Figura 4 que apresenta uma análise mais detalhada apenas para a população exposta a níveis de $L_{den}$ e de $L_n$ superiores aos legislados, por quilómetro, permite constatar novamente que estes indicadores são superiores nas AE-1ª fase e têm uma expressão muito reduzida nas AE-2ª fase.

Comparando este indicador para o $L_{den}$ e para o $L_n$, verifica-se que a população exposta a níveis superiores aos legislados tem uma maior dimensão quando considerado o $L_n$. Desta forma, o $L_n$ configura-se com um indicador chave e o período nocturno como um período crítico para tomada de decisão de intervenção.

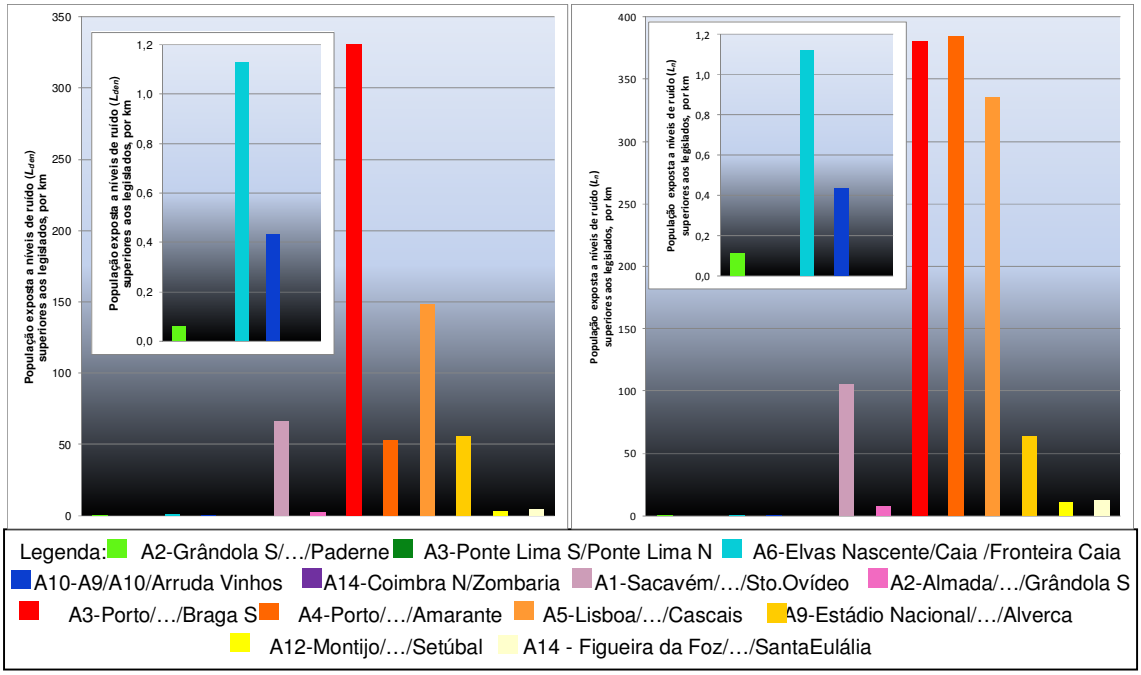



Figura 4. População exposta a níveis de ruído, $L_{den}$ e $L_n$, superiores aos legislados, por quilómetro

Distância média da isófona ao eixo da via

Relativamente à distância média das isófonas de $L_{den}$ equivalente a 55 dB(A), 65 dB(A) e 75 dB(A) que se apresenta na Figura 5, verifica-se que, para todas as isófonas analisadas, as 5 maiores distâncias correspondem sempre a auto-estradas abrangidas pela 1ª fase. No entanto, não se verifica que as distâncias das várias isófonas, em análise, ao eixo da via sejam sempre superiores nas AE-1ª fase.

Quanto ao espectro de variação das distâncias das várias isófonas ao eixo da via tem-se que: a isófona de $L_{den}$ equivalente a 55 dB(A) varia entre 109,9 m e 464,2 m, a isófona de $L_{den}$ equivalente a 65 dB(A) varia entre 29,8 m e 118,6 m e a isófona de $L_{den}$ equivalente a 75 dB(A) varia entre 0 m e 29,9 m.

Especificamente no que concerne à distância da isófona de $L_{den}$ equivalente a 65 dB(A) ao eixo da via, por ser a isófona correspondente ao limite legal, obtém-se a seguinte ordenação crescente das

auto-estradas: A4, A10–A9/A10/Arruda dos Vinhos, A2-Grândola Sul/…/Paderne (A22), A14-Coimbra Norte/Zombaria, A3-Porto/…/Braga Sul, A3-Ponte de Lima Sul/Ponte de Lima Norte, A2-Almada/…/Grândola Sul, A6, A12, A1, A5 e A9 (com a mesma distância) e A14-Figueira da Foz/Santa Eulália.

Constata-se que o tráfego não é o único factor a influenciar o valor deste indicador. Outros factores relacionados sobretudo com os obstáculos à propagação do som e topografia têm também uma enorme relevância.

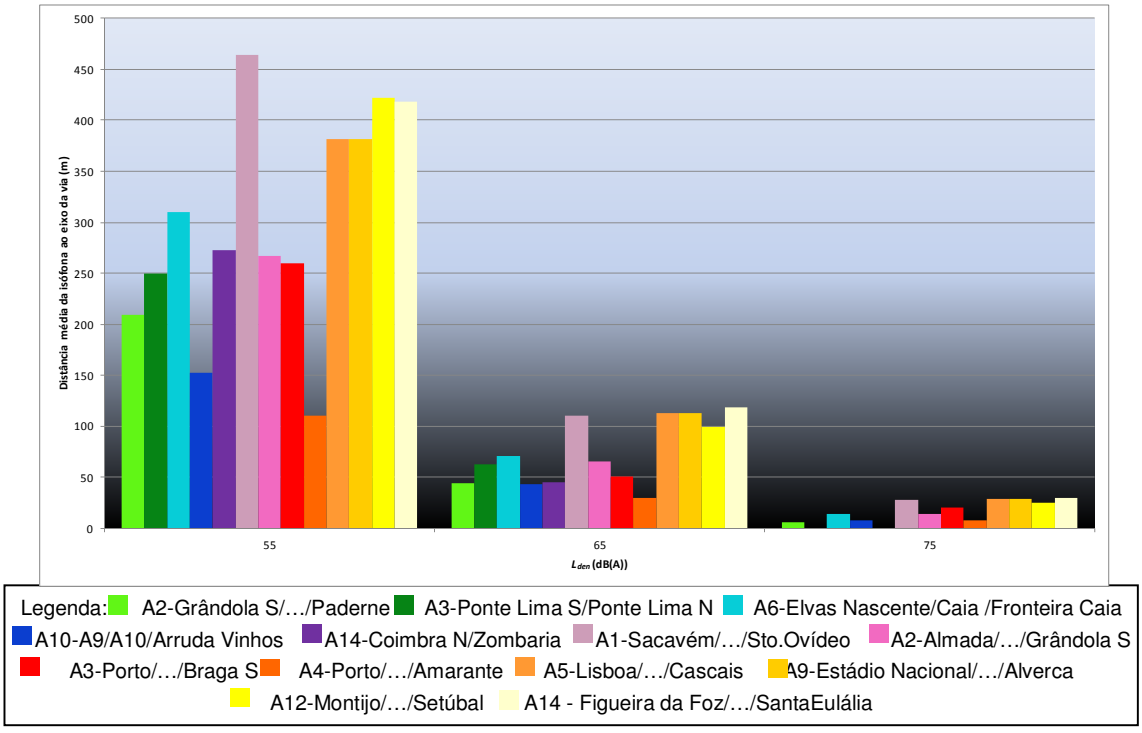
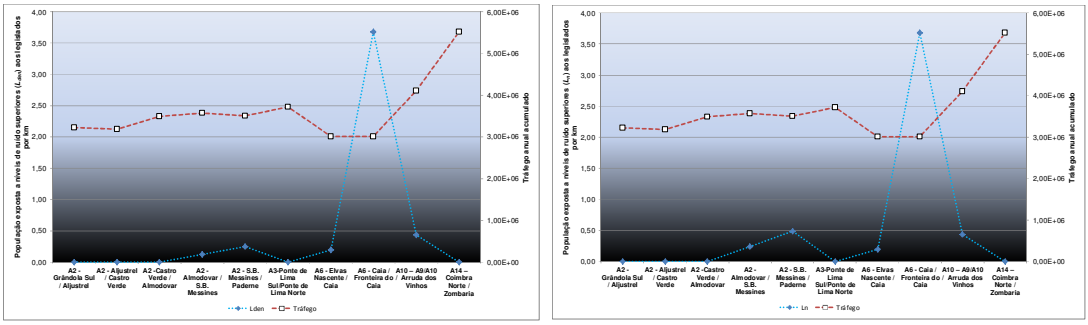


Figura 5. Distância média da isófona ao eixo da via

Variação de indicadores com o tráfego – caso de estudo AE-2ª fase

A Figura 6 representa, a variação, com o tráfego, da população exposta a níveis de ruído, $L_{den}$ e $L_n$, superiores aos legislados, por quilómetro. A referida figura demonstra, a partir do caso de estudo das AE-2ª fase, que não existe uma relação directa entre o valor desses indicadores e o tráfego. Para este indicador contribuem em grande medida os níveis de população existente na envolvente das auto-estradas.



Nota: A linha que une os pontos de dados não é uma linha de tendência nem representa qualquer tipo de dados, tem apenas um papel ilustrativo para demonstração de inexistência de correlação
Figura 6. População exposta a níveis de ruído, $L_{den}$ e $L_n$, superiores aos legislados, por quilómetro e tráfego anual acumulado

## 4. OBSERVAÇÕES E REFLEXÕES

Da análise anteriormente efectuada, verificou-se que existem várias situações merecedoras de uma reflexão futura aprofundada.

Efectivamente verificou-se que o $L_n$ se configura com um indicador chave e o período nocturno como um período crítico para tomada de decisão de intervenção. Assim sendo, e tendo em conta que o período nocturno pode funcionar como um alerta para a necessidade de intervenção, julga-se que poderá ser ponderada a possibilidade de, em futuros planos de monitorização que decorrem de estudos de impacte ambiental que previamente já procederam a uma caracterização exaustiva do ambiente sonoro, apenas se avaliar o $L_n$ e só pontualmente, no caso de receptores com sensibilidade apenas no período diurno como sejam as creches e escolas, efectuar a avaliação do $L_{den}$. Da mesma forma, poderá ser ponderada, em estudos de ruído e planos de redução de ruído, efectuar, numa fase prévia, apenas a avaliação do $L_n$, para despistar as situações em que é necessário actuar e só nesses casos alargar a avaliação para os restantes períodos, diurno e entardecer.

Desta forma, optimizavam-se o número de medições de ruído e de avaliações, designadamente limitando as avaliações no período de entardecer cuja curta duração exige a alocação de muitos recursos e torna a avaliação muito dispendiosa.

Adicionalmente a análise aos indicadores associados à população exposta a diferentes níveis de ruído que foi anteriormente efectuada. permite apurar uma característica transversal a todas as auto-estradas da Concessão Brisa abrangidas pela 2ª fase da implementação da Directiva: os impactes sobre o ambiente sonoro daquelas auto-estradas não são significativos. Esta situação deve-se à coincidência, ou não, de se tratarem de auto-estradas com menos tráfego e com pouca população na envolvente. Assim sendo, na concessão Brisa, as futuras reavaliações das grandes infra-estruturas de transporte rodoviário (GIT) que estão previstas na Directiva devem incidir nas auto-estradas com mais de 6 milhões de passagens de veículos por ano e os recursos devem ser prioritariamente canalizados para as auto-estradas abrangidas pela 1ª fase.

Nas AE-2ª fase da Concessão Brisa apenas existem situações pontuais de incomodidade devida ao ruído que requerem igualmente um tratamento pontual e muito "cirúrgico", não existindo fundamento, nem sentido, caso se mantenham as condições de exploração das vias, para se encetarem futuras reavaliações com estudos de carácter global às auto-estradas da Concessão Brisa com mais de três milhões e menos de 6 milhões de passagens de veículos por ano, conforme previsto na Directiva.

Seria interessante que se estendesse este tipo de análise também a todas as GIT nacionais, eventualmente por parte da entidade nacional que tutela as infra-estruturas de transporte, para se perceber se a característica anteriormente identificada, de existência de impactes pouco significativos ao nível do ambiente sonoro, é uma característica de todas as rodovias abrangidas pela 2ª fase ou se apenas se revela na realidade da Concessão Brisa. Tal análise foi reveladora no caso da Concessão Brisa e poderá ser importante na determinação, de forma mais eficiente, dos investimentos a realizar a nível nacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] *Decreto-Lei n.º 146/2006* de 31 de Julho de 2006 e Declaração *de Rectificação n.º 57/2006* de 31 de Agosto de 2006.

[2] *Decreto-Lei n.º 9/2007* de 17 de Janeiro de 2007, *Declaração de Rectificação n.º 18/2007* de 16 de Março de 2007 e *Decreto-Lei n.º 278/2007* de 1 de Agosto de 2007.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDOS DE CARRETERAS FASE 1 VS FASE 2

PACS: 43.50.Lj

López Santos, Fernando; Carretero de la Rocha, David; Giménez Anaya, Isabel
SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L.
Dirección: Avda. San Francisco Javier, nº 9, Edif. Sevilla 2, Planta. 5ª, Mód. 27-28; 41018 SEVILLA. ESPAÑA
Tel: 954510031, Fax: 954250684
E-Mail: flopez@sincosur.es, dcarretero@sincosur.es, isabel@sincosur.es

## ABSTRACT

The Spanish Ministry of Environment sets up, in its 2nd phase Strategic Noise Maps (SNM) data delivering legislation, source dependent comparative forms and criteria aimed at determining the evolution of noise pollution using the Strategic Noise Maps calculated in the 1st and 2nd phase. In order to determine them correctly it is necessary to define a work methodology which fixes the existing differences between the input data from each stage. This paper shows a comparative on road infrastructures in Canarias using a methodology developed for that purpose, explaining the problems faced and the data obtained.

## RESUMEN

El Ministerio de Medio Ambiente establece en sus instrucciones de entrega de datos de los Mapas Estratégicos de Ruidos (MER) de la 2ª fase unos formularios y criterios comparativos en función de la fuente, para la determinación de la evolución de la contaminación acústica a partir de los Mapas Estratégicos de Ruidos calculados en la 1ª y 2ª fase. Para su correcta determinación es necesario definir una metodología de trabajo que salve las diferencias existentes entre los datos de entrada de los Mapas en cada fase. En la presente comunicación se presenta la comparativa realizada sobre las infraestructuras viarias de Canarias a través de una metodología desarrollada al efecto, exponiendo la problemática encontrada y los resultados obtenidos.

## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L. y Trazas Ingeniería S.L. han realizado los Mapas Estratégicos de Ruido (MER) de la Comunidad Autónoma de Canarias correspondientes a los grandes ejes viarios con un tráfico superior a los tres millones de vehículos al año. Estos mapas comprenden más de 950 Km de infraestructuras viarias sobre las que se ha determinado los niveles sonoros en torno a las vías, los niveles de inmisión en fachada de cada uno de los edificios de cada ámbito de estudio y la población expuesta al ruido.

Una de las últimas tareas comprendidas dentro de la elaboración de dichos MER se planteaba como la comparativa de los resultados de los MER elaborados en la 2ª fase del año 2012, la actual, con los de la 1ª fase, elaborados en 2007.

Cabe tener presente que la 1ª fase de elaboración de los MER consideraba todas aquellas infraestructuras viarias del territorio español con un tráfico anual superior a más de 6 millones de vehículos al año, mientras que los de la 2ª fase (y posteriores) consideran todas aquellas de más de 3 millones de vehículos al año.

Por lo expuesto anteriormente, para desarrollar la citada comparativa nos encontramos con un primer problema: no todas las carreteras de la 2ª fase (2012) pueden ser comparadas con las de la 1ª (2007), ya que la 1ª fase no contempló todas aquellas infraestructuras viarias con un tráfico anual comprendido entre 3 y 6 millones de vehículos al año.

Por otro lado, existe un segundo problema: puede que los tramos evaluados en ambas fases sean distintos. Ciertamente, para una misma carretera, puede haber tramos con un tráfico anual de más de 6 millones de vehículos (que formarían parte de la 1ª y 2ª fase) y tramos cuyo tráfico anual esté comprendido entre 3 y 6 millones (que únicamente formarían parte de la 2ª fase).

La tramificación de la infraestructura viaria en función de su tráfico anual nos presenta un tercer problema: debido a la evolución del tráfico con el paso del tiempo, podría darse la posibilidad de que existieran tramos que se hayan estudiado en la 1ª fase y no en la 2ª.

También existen problemas relativos a las modificaciones que se hayan podido producir sobre la carretera y el entorno: modificación geométrica del trazado, variación de las características de la vía…

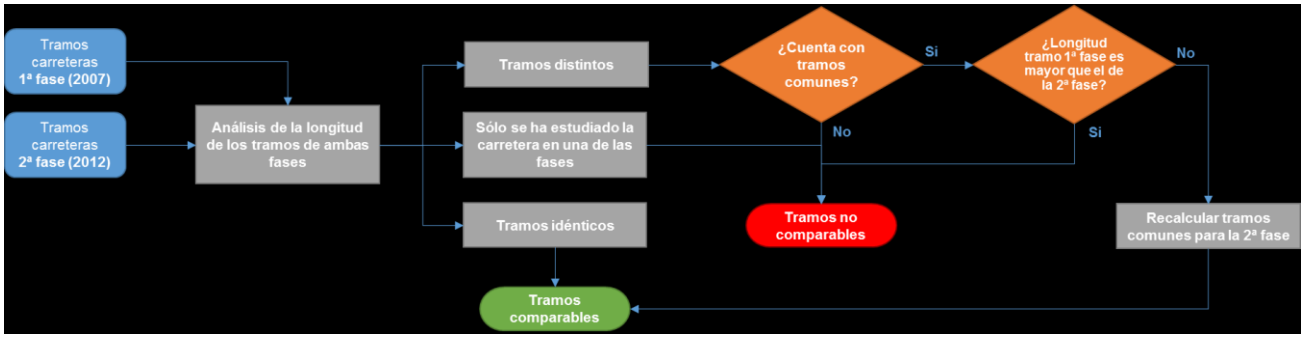
Por si fueran pocos problemas, existe uno que tiene una repercusión directa en los resultados obtenidos en cada fase: la precisión de los datos de entrada al modelo acústico predictivo y la metodología que se haya puesto en marcha para elaborar los Mapas Estratégicos de Ruido.

La presente comunicación expondrá la experiencia que vivimos a la hora de realizar la comparativa de los MER de la 2ª fase de las carreteras de las Islas Canarias con los correspondientes de la 1ª fase. Para ello, en el siguiente apartado se expondrán todos los aspectos metodológicos sobre la comparativa desarrollada, en lo referente a la obtención de tablas de datos y mapas comparativos de ambas fases. Posteriormente, se mostrarán los resultados de aplicar esta metodología explicando las peculiaridades que se han encontrado en nuestra experiencia. Finalmente, presentaremos unas conclusiones sobre el trabajo desarrollado, que bien puedan servir en cualquier otra tarea de comparativa de resultados de mapas de ruido.

## 2.- METODOLOGÍA

Es necesario, como punto de partida, poner en marcha un proceso de síntesis de información de la 1ª fase de los MER de las infraestructuras viarias de interés, con el fin de obtener el listado completo de vías estudiadas en la 1ª fase, con indicación de los puntos kilométricos de inicio y fin, la denominación de la Unidad de Mapa Estratégico (UME), el tráfico anual o la intensidad media diaria (IMD), así como la información asociada al MER: mapas de niveles sonoros y de afección (en formato de dato espacial, SHP) y las tablas de población expuesta, con indicación de la población, viviendas, alumnos (en el caso de centros docentes) y camas (en el caso de centros sanitarios) expuestos a distintos rangos de niveles sonoros, e indicación de los incumplimiento de los Objetivos de Calidad Acústica.

Una vez se obtenga esta información, se debe comparar el listado de la 1ª fase con el de la 2ª. Hay que tener presente que únicamente se pueden comparar tramos comunes (cuyo puntos kilométricos de inicio y de fin sean coincidentes) y cuyo trazado no se haya visto alterado. Para determinar si se pueden comparar los tramos de carreteras, se puede hacer uso del siguiente esquema:




Para la comparativa se parte del hecho de que los datos de la 1ª fase son invariables y de estos no se pueden hacer recálculos para las comparativas. De ahí que no se puedan comparar tramos de carreteras de la 2ª fase si son de longitud inferior a los de la 1ª fase. **Es imprescindible que los tramos de la 2ª fase sean idénticos a los de la 1ª fase para la obtención de datos realmente comparables.**

En aquellos casos en los que haya que realizar una selección de los tramos comunes de las carreteras de ambas fases, será conveniente hacer uso de un sistema de información geográfica para tal efecto. No hay que olvidar que esta selección implica una modificación del ámbito de estudio de la carretera, por lo que también se tendrán que seleccionar los edificios, obstáculos, y topografía que se incluye dentro del nuevo ámbito de estudio del tramo común. La idea fundamental es que el nuevo ámbito de estudio sea coincidente con el ámbito de estudio de la 1ª fase de los MER.

Una vez se obtengan los tramos comunes, será necesario volver a realizar un cálculo de los niveles sonoros y de la población expuesta. Es necesario proceder de esta forma para no contemplar la aportación acústica de los tramos de carreteras que, habiéndose calculado en la 2ª fase, no se contemplaron en la 1ª. No vale, por lo tanto, “cortar” los niveles sonoros de la 2ª fase en función de la extensión del tramo común. Para el cálculo de receptores de inmisión acústica en fachada de los edificios, elementos que nos servirá para determinar el dato de población expuesta, habrá que proceder de la misma forma.

Si los tramos no comunes son muy reducidos, puede ser conveniente, con el fin de optimizar los recursos informáticos, recalcular los tramos NO comunes y restar del total de los resultados de la 2ª fase, de forma energética la malla de niveles sonoros y de forma aritmética las tablas de población expuesta para la obtención de los resultados de los tramos comunes.

De la comparativa se deberán obtener dos grupos de resultados. Por un lado resultados estadísticos, que se correspondan con tablas de población expuesta, donde se expresen número de habitantes y viviendas expuestas a distintos rangos de nivel sonoro, para los indicadores Ldia, Ltarde, Lnoche y Lden. Así mismo, se deberá obtener el número de centros docentes y sanitarios expuestos a niveles superiores a 55, 65 y 75 dB para el indicador Lden. En el caso de disponer de la información, también sería interesante conocer el número de alumnos y de camas expuestos. También será necesario incluir el dato de superficie expuesta (en $km^2$).

Por otro lado, habrá que generar resultados gráficos que reflejen la variación de los niveles sonoros en ambas fases. Este planteamiento se puede realizar de muchas formas distintas. En la presente metodología se plantean dos:

- Realizar una colección de planos del tramo común entre ambas fases, donde cada hoja del plano muestre la misma vista de la situación acústica de la 1ª fase 2007 y de la 2ª de 2012, con representación de los rangos de niveles sonoros por colores.
- Realizar una colección de planos del tramo común entre ambas fases, donde se represente la diferencia de nivel entre ambas fases. Mediante tratamiento de las isófonas en un sistema de información geográfico, se pueden determinar y representar, tomando como referencia un indicador concreto y un nivel sonoro umbral, las zonas donde aumentan los niveles (representando en color rojo) y las zonas donde disminuyen (en color verde)

A la hora de obtener los resultados de la comparativa, habrá que tener en cuenta los datos, y la precisión de los mismos, que se hayan usado en ambas fases. Por un lado, un cambio sustancial de la topografía y de la resolución de la misma en los modelos de simulación será factor relevante en la propagación del sonido. Este hecho será de especial relevancia en aquellos tramos que discurran en trinchera, o cuenten con obstáculos formados por el propio terreno, como taludes. Por otro lado, la inclusión, o no, de otras barreras que dificulten la propagación del sonido, como pantallas acústicas, también será relevante en la comparativa de resultados.

En cuanto al cálculo de población, la resolución de los edificios, así como el método para estimar la población expuesta, será un factor decisivo. Por un lado, con respecto a las edificaciones, si bien, por motivos de optimización de recursos informáticos puede ser útil la utilización de entidades de “manzanas” (agrupaciones de edificios) para el cálculo de receptores de niveles sonoros en fachada, para la determinación de la población expuesta lo ideal es utilizar entidades de edificios, donde cada edificio tenga asignada la población exacta que alberga. Por otro lado, el método de estimación de la población se conforma como uno de los factores críticos de la comparativa. Existen multitud de métodos para obtener la población expuesta al ruido, unos más precisos que otros, por lo que para obtener resultados comparables, necesitamos comparar datos obtenidos de la ejecución de métodos idénticos. Es necesario, por lo tanto, conocer el método de estimación de población usada en la 1ª fase. Se recomienda que se haga uso del método END, de la Directiva Europea, que considera que toda la población de un edificio se encuentra expuesto a un nivel máximo de inmisión, obtenido como el máximo nivel registrado en la fachada más expuesta de dicho edificio. Si bien este método sobreestima la población expuesta, es el requerido por la Comisión Europea para la entrega de los datos, por lo que todos los MER deberían considerar, al menos, este método para el cálculo de la población expuesta, independientemente del uso de otros métodos adicionales para un conocimiento más exacto de la población realmente expuesta.

Por último, existen otras variables que afectarán a los resultados de la comparativa, propias de la elaboración y configuración del modelo de predicción acústico. La forma en la que se ha construido el modelo, el software predictivo utilizado para tal efecto con sus peculiaridades, el orden de reflexión del sonido, el radio de búsqueda de fuentes sonoras, el tamaño de malla de cálculo, etc.

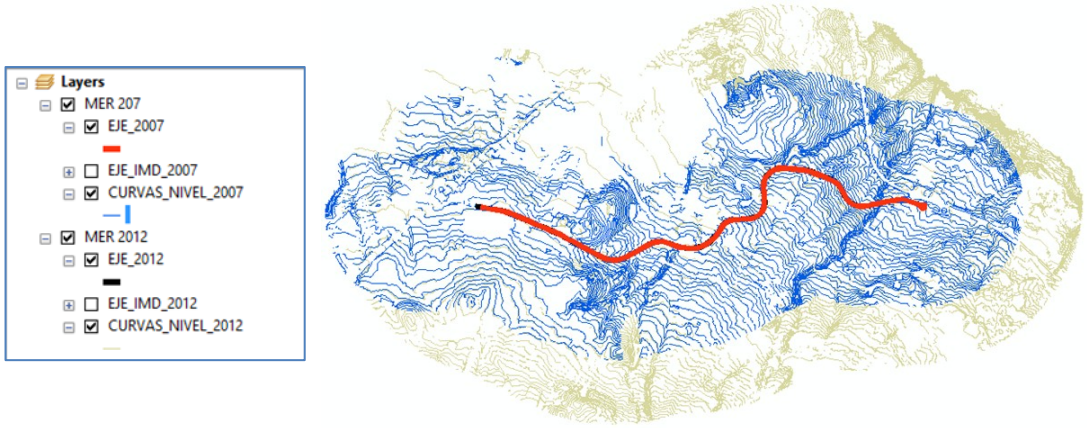
## 3.- RESULTADOS OBTENIDOS

Tras obtener los resultados de los Mapas Estratégicos de Ruido de las carreteras de las Islas Canarias se han determinado los datos de población expuesta a distintos rangos de niveles sonoros, para la población residencial, los centros docentes y centros sanitarios. Comparando los datos obtenidos en el ese proyecto, relativos al año 2012, con respecto a los de 2007, se han apreciado diferencias sustanciales de población expuesta al ruido.

En la presente comunicación se analizará el caso de la carretera TF-2, de tramo de cálculo común en 2007 y 2012.

### 3.1.- Ámbito de estudio

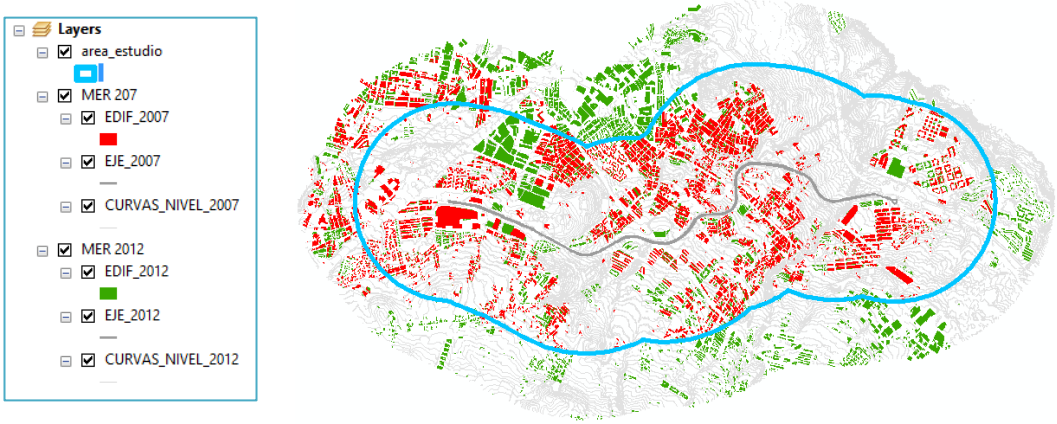
Se ha comprobado que el ámbito de estudio considerado en el 2012 (de 1,5 km a cada margen de la carretera) es aproximadamente 600 metros mayor que la considerada en el 2007. Por otro lado, la extensión del eje de la vía es la misma, como se aprecia en la siguiente figura:




En cuanto al tráfico de la carretera, se comprueba que, considerando las mismas estaciones de aforo que en 2007, ha habido un incremento del volumen de vehículos en 2012 en ciertos tramos, llegando casi a duplicar la intensidad de vehículos. Para el porcentaje de vehículos pesados, en 2007 se utilizó un único dato por tramo para todos los periodos del día, mientras que para el 2012 se diferenciaron porcentajes distintos según el periodo del día. La velocidad de paso de vehículos es similar en ambos casos. Con respecto a las características geométricas de la carretera, ambas cuentan con datos similares y comparables.

### 3.2.- Edificios considerados en el cálculo

Con respecto al número de edificios considerados en el cálculo, en la 2ª fase de 2012 se tuvieron en cuenta un mayor número de edificios, como se aprecia a continuación:




Valorando únicamente los edificios dentro del área de estudio de la 1ª fase de 2007, existen 2363 entidades en 2007 y 8469 en el caso de la 2ª fase de 2012. Este dato no es comparable, pues en el año 2007 las edificaciones se caracterizaron como manzanas, mientras que para el 2012 se caracterizaron como edificios individuales:




Si se consideran manzanas en la 2ª fase de 2012, para que la comparación sea válida, el resultado es de 2363 manzanas en 2007 y de 2560 manzanas en 2012.

Se observa, así mismo, que muchos de los edificios considerados en 2007 están incompletos.

### 3.3.- Población de los edificios

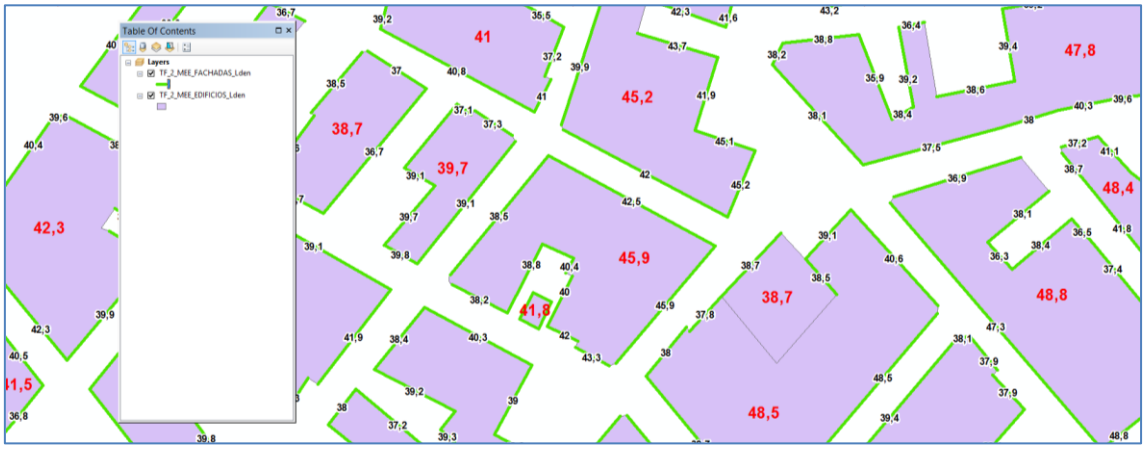
En primer lugar, es necesario considerar que, para el caso del MER de 2012, la población se ha repartido entre los edificios residenciales en función del volumen de cada edificio residencial, atendiendo a las secciones censales, mientras que para el caso de 2007 este reparto se ha hecho considerando manzanas de edificios, es decir, agrupaciones de ellos con

una altura y una geometría que podría no ser exactamente la original con respecto al conjunto de edificios que lo componen.

Según esto, considerando únicamente edificios residenciales dentro del área de estudio de 900 metros establecido en 2007, se obtienen 56.360 habitantes en el 2007 y 60.037 habitantes en el 2012. Con respecto a los edificios sensibles, en 2007 se contabilizan 3 centros sanitarios y 40 docentes, mientras que en el 2012, dentro de la misma área, se consideran 4 centros sanitarios y 35 docentes.

### 3.4.- Resultados 2007 - 2012

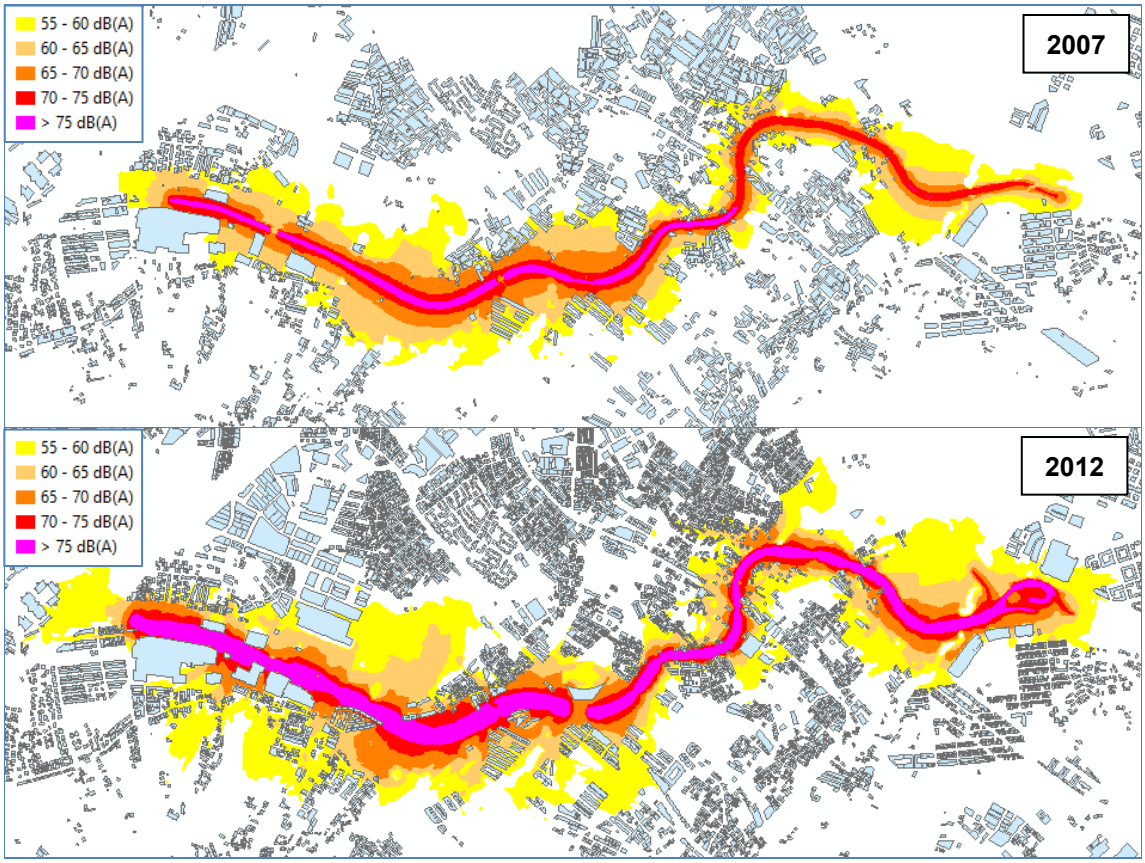
Tras revisar los ficheros geográficos disponibles de la 1ª fase de 2007, se ha podido determinar que para la estimación de población expuesta al ruido se asumió que cada edificio estaba expuesto en su totalidad al valor máximo de la fachada más expuesta (método END), como se observa a continuación:



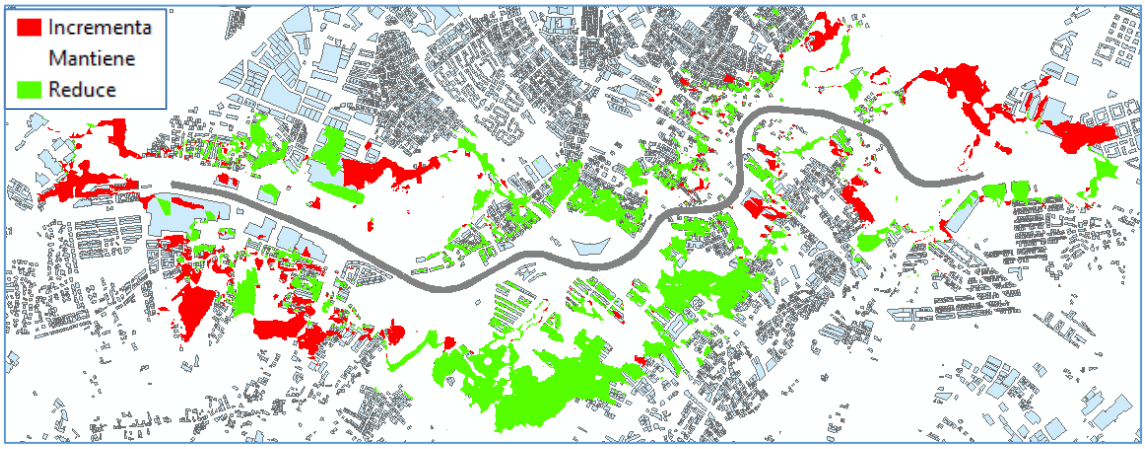

Comparando los datos de población expuesta de ambas fases se obtienen los siguientes resultados. Los datos de la 1ª fase se han obtenido del documento de exposición pública de los MER de 2007:

| | | 2007 END | | | | 2012 END | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| UME | Lden | Población (cent.) | Viviendas (cent.) | Ed. Educativos (ud.) | Ed. Sanitarios (ud.) | Población (cent.) | Viviendas (cent.) | Ed. Educativos (ud.) | Ed. Sanitarios (ud.) |
| TF-2 | > 55 | 65 | 30 | 5 | 0 | 119 | 44 | 6 | 1 |
| | > 65 | 14 | 7 | 1 | 0 | 28 | 10 | 0 | 1 |
| | > 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 |

Analizando los resultados de 2007 y 2012, se ha detecta un aumento considerable de población expuesta en 2012 (fundamentalmente por el aumento del nivel sonoro debido al incremento del del volumen de tráfico), lo cual también queda patente al hacer la comparativa gráfica de Lden:




Se ha representado también el aumento y la reducción de los niveles sonoros en base a la isófona 55 dBA del indicador Lden del MER de 2012 con respecto a la 1ª fase de 2007. En esta gráfica se aprecia mejor la variación de los niveles sonoros.




## 4.- CONCLUSIONES

De la experiencia adquirida tras realizar la comparativa entre los MER de la 1ª (2007) y 2ª fase (2012) de las carreteras de las Islas Canarias, se han obtenido diversas conclusiones.

Por un lado, **al no existir una metodología común para realizar la comparativa de resultados de los MER de ambas fases, resulta complicado la obtención de conclusiones** acerca de la evolución de los resultados. Así mismo, ya que la metodología de trabajo, el grado de precisión de los datos básicos para crear el MER y la forma de generar los resultados puede variar sustancialmente según el autor del mapa de ruidos, se pueden obtener datos dispares que no atiendan a conclusiones lógicas.

En cualquier caso, para asegurar la comparabilidad, **como principio básico, los tramos de carreteras de ambas fases deben ser comunes.** No se podrán comparar tramos comunes, si los tramos de la 1ª fase son más largos, o cuentan con tramos adicionales separados, ya que se sobreentiende que los datos de la 1ª fase son invariantes y no se pueden hacer recálculos de estos, a diferencia de lo que ocurre con los de la fase 2, de los que se tendrán control y se podrán hacer recálculos reajustando el ámbito de estudio.

Por otro lado, a la hora de comparar los resultados de los MER de ambas fases, se propone que los datos de población expuesta que se comparen sean los resultantes tras la aplicación del **método de estimación de la población expuesta END**, definido en la Directiva Europea 2002/49/CE, en el que se asume que toda la población de un edificio está sometida al nivel acústico más elevado soportado por la fachada más expuesta al ruido. Si bien este procedimiento nos proporcionará resultados sobreestimados con respecto al resultado real, es el método que requiere la Comisión Europea para la entrega de datos, y por lo tanto, todos los MER deberían haber aplicado, al menos, este procedimiento.

Independientemente de lo expuesto en el presente artículo, en la actualidad, el *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente* (*MAGRAMA*), con el fin de organizar la recopilación de los MER de la 2ª fase, **ha definido una serie de formatos para la entrega** de la información entre los que se incluye, dentro de la entrega de datos estadísticos, unas **tablas comparativas de los resultados de la 1ª y 2ª fase**, en la que debe especificarse información, para cada fase, de:

- Tráfico anual
- Población expuesta fuera de las aglomeraciones, para los rangos del indicador Lden, Ldia y Ltarde: 55-59, 60-64, 65-69, 70-75 y > 75 dBA.
- Población expuesta fuera de las aglomeraciones, para los rangos del indicador Lnoche: 50-54, 55-59, 60-64, 65-69 y > 70 dBA.
- Área ($km^2$) expuesta a Lden > 55, > 65 y > 75 dBA (incluyendo las aglomeraciones)
- Población ($km^2$) expuesta a Lden > 55, > 65 y > 75 dBA (incluyendo las aglomeraciones)
- Viviendas ($km^2$) expuesta a Lden > 55, > 65 y > 75 dBA (incluyendo las aglomeraciones)

## 5.- BIBLIOGRAFÍA

[1] *Mapas de ruido de carreteras de Canarias del año 2012*. U.T.E. SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L. - TRAZAS Ingeniería S.L.

[2] *Mapas de ruido de carreteras de Canarias del año 2007*. U.T.E. SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L. - TRAZAS Ingeniería S.L.

[3] *Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental*. «DOUE» núm. 189, de 18 de julio de 2002, páginas 12 a 25.

[*4] Instrucciones para la entrega de los datos asociados a los Mapas Estratégicos de Ruido de la 2ª fase. Octubre 2011. Ministerio de Agricultura, Alimentac*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA 2ª FASE DE LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDOS DE LA RED DE CARRETERAS DE ANDALUCÍA

PACS: 43.50.Rq

Gey Flores, Ricardo[1]; Cueto Ancela, José Luis[1]; Hernández Molina, Ricardo[1]; Alina Petrovici[2]; Sales Márquez, Diego[1]
(1) Universidad de Cádiz. Laboratorio de Ingeniería Acústica.
Edificio C.A.S.E.M. Campus Río San Pedro
11510 Puerto Real (Cádiz) España
Tel: +34 956 016051
E-Mail: ricardo.gey@uca.es
(2) Universidad "Vasile Alecsandri" de Bacau.
Calea Marasesti 157
600115 Bacau. Rumanía

## ABSTRACT

Once developed the second round of Strategic Noise Maps of the major roads under the competence of the Regional Government of Andalusia, the main results are presented here. A comparison between the exposed population data calculated according to END method and German method VBEB (2007) is performed and presented.

Keywords: Strategic Noise Maps

## RESUMEN

Tras la elaboración de los Mapas Estratégicos de Ruido (MER) de la Red de Carreteras de Andalucía en su 2ª Fase, se presentan aquí los principales resultados obtenidos. Se han elaborado los MER de los grandes ejes viarios, con más de tres millones de vehículos al año, de la red de carreteras de titularidad autonómica de la Junta de Andalucía. Se realiza una comparativa entre los datos de población expuesta calculados según el método propuesto en la Directiva END y los datos de población expuesta calculados según una variante del método alemán VBEB (2007).

Palabras clave: Mapas Estratégicos de Ruido de Carreteras

## INTRODUCCIÓN

En relación a la realización de Mapas Estratégicos de Ruido (MER) en su segunda fase, es bien sabido que los estados miembros garantizarán que se hayan elaborado y aprobado dichos mapas sobre la situación del año civil anterior, correspondientes a todas los grandes ejes viarios con más de 3.000.000 vehículos/año presentes en su territorio, y previamente definidos. Todas las mejoras introducidas en los procesos de realización de los mapas y los planes de acción deben redundar sobre la mejora de la calidad del producto final, y por tanto la utilidad, de estos estudios. De esta manera, la idea que subyace en la metodología de elaboración de los mapas de ruido por la Junta de Andalucía de carreteras de su competencia, fue desde el principio del proyecto:

- La generación de un procedimiento de trabajo (a nivel de Instrucciones Técnicas) que garantizara diversas cuestiones relacionadas con la calidad de los mapas estratégicos de ruido de carreteras en Andalucía.
- La trazabilidad de los datos empleados y el procesamiento de los mismos, a pesar de la distribución de tareas entre varios grupos de trabajo.
- La existencia de vías alternativas de desarrollo de los mapas cuando faltaran datos críticos para el progreso del trabajo y la calidad de sus resultados.

Lo cual garantizaría la calidad de los mapas para los planes de acción y la comparabilidad de los mismos. La Tabla 1 recoge el número de Unidades de Mapa Estratégico (UMEs) y los kilómetros de carretera estudiados por provincia y para toda Andalucía:

| PROVINCIA | Nº de UMEs | Longitud total en km | Área evaluada en km$^2$ |
|---|---|---|---|
| Almería | 11 | 185,035 | 607 |
| Cádiz | 11 | 219,124 | 689 |
| Córdoba | 4 | 21,680 | 83 |
| Granada | 8 | 253,780 | 781 |
| Huelva | 11 | 110,020 | 360 |
| Jaén | 2 | 43,470 | 132 |
| Málaga | 16 | 192,095 | 582 |
| Sevilla | 33 | 308,035 | 917 |
| Andalucía | 96 | 1333,239 | 4151 |

Tabla 1 – Cifras globales que muestran la dimensión del trabajo realizado.

En relación a la tipología de las carreteras cuyos MER han sido elaborados, la Tabla 2 muestra la distribución en porcentaje para cada provincia y para toda Andalucía de los tres tipos de vías evaluadas: autovías, carreteras de doble calzada y carreteras convencionales.

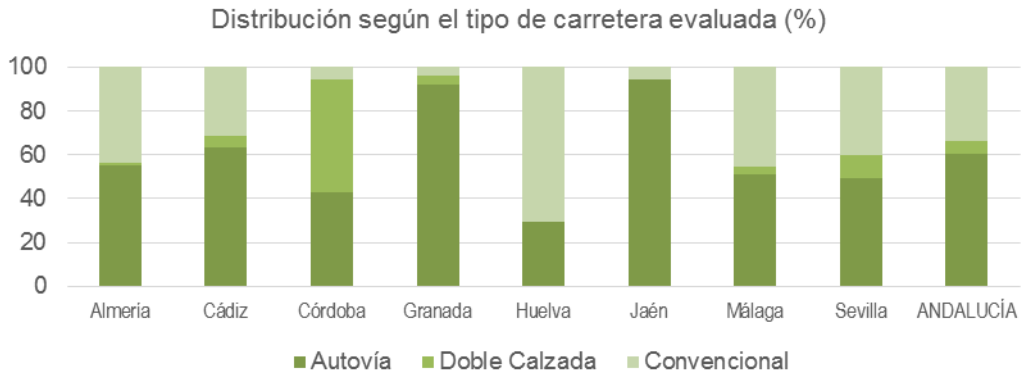



Tabla 2 – Distribución en % según la tipología de la carretera.

El objetivo de esta comunicación se centra en presentar los principales resultados obtenidos tras la realización de los mapas estratégicos de ruido, comparando además las diferencias existentes entre los datos de población expuesta calculados según el método propuesto en la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (END: Environmental Noise Directive) [1] y los calculados según una variante del método alemán VBEB (2007) [2].

A través del método END se estima el número de personas cuyas viviendas están expuestas a diferentes rangos de valores de los índices de ruido (la END exige la comunicación a la Comisión de los datos relativos a Lden y Lnoche), a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo en la fachada más expuesta. Este método presupone que todos los habitantes de un edificio están sometidos al mayor nivel de presión sonora registrado en la fachada más expuesta.

El método alemán VBEB (Vorläufige Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm) permite obtener valores de afección a los que se encuentra expuesta la población más cercanos a la realidad. El método distribuye receptores de niveles de presión sonora a lo largo de todas las fachadas del edificio. En nuestro caso, la variante a este método ha consistido en repartir los receptores a diferentes niveles de altura en función del número de plantas del edificio, y no únicamente a 4 metros.

## PRINCIPALES DIFICULTADES ENCONTRADAS EN LA ELABORACIÓN DE LOS MER

Antes de proceder a mostrar los resultados obtenidos de los MER vamos a describir las principales dificultades encontradas a la hora de elaborar los mapas:

- La mayoría de las fuentes de información geográfica facilitadas tenían una escala superior a la necesaria para la recreación de los modelos 3D en el software de simulación acústica empleado, CadnaA versión 4.3 (DataKustik).
- Ninguna fuente de información geográfica pudo ser empleada directamente en los modelos 3D. Todas tuvieron que ser tratadas mediante Sistemas de Información Geográfica para adecuarlas a nuestras necesidades.
- Fue necesario un estricto control de calidad de los datos facilitados para verificar que las intensidades medias diarias de vehículos y los porcentajes de pesados que circulaban en cada tramo de carretera a estudio eran los correctos antes de proceder al cálculo predictivo mediante software.

Una vez tratada toda la información geográfica a emplear y creados los modelos de simulación acústica en 3D para cada UME, se procedió al cálculo mediante software, tanto de la malla de receptores 4 metros para obtener las líneas isófonas como del mapa acústico de edificios con receptores a todas las alturas (plantas) para obtener el mapa de fachadas. Los más de 1300 km de carreteras a estudio, con algo más de 4100 $km^2$ de superficie a evaluar, requirieron de un gran tiempo computacional.

## RESULTADOS POR PROVINCIAS

Una vez calculados los modelos tridimensionales de cada UME se procedió a la exportación de las isófonas y de los receptores en fachada de los cuatro índices evaluados para su tratamiento con SIG. A través de diversas herramientas de geoprocesamiento se obtuvieron los datos de población, viviendas y superficie expuesta. A continuación, las figuras 1 a 8 muestran los datos de población expuesta por intervalos de nivel sonoro para los índices de ruido Ldía y Lnoche para las ocho provincias andaluzas.

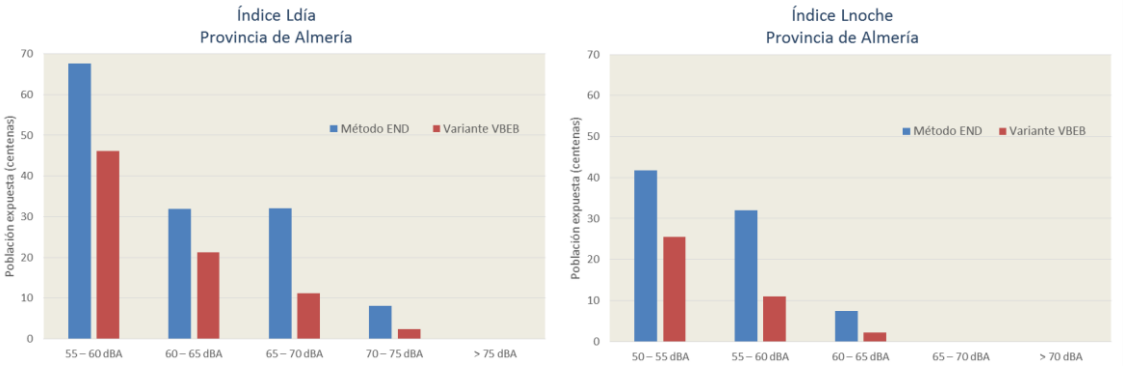



Figura 1 – Almería. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 228359 habitantes.

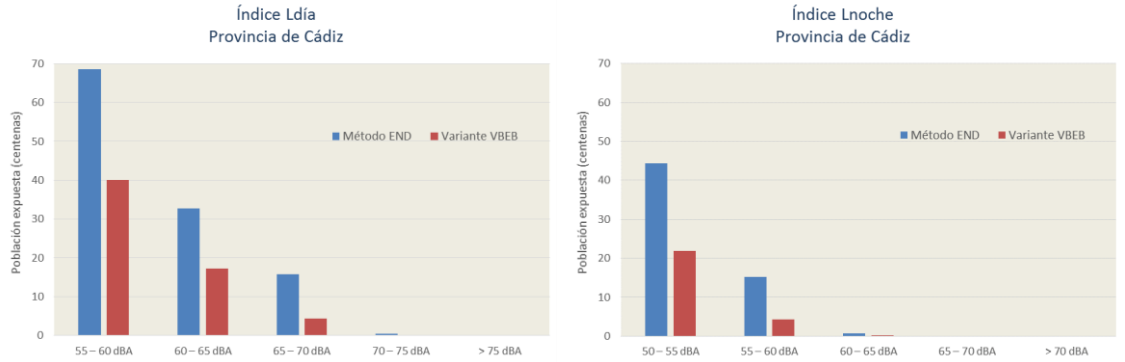



Figura 2 – Cádiz. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 434060 habitantes.

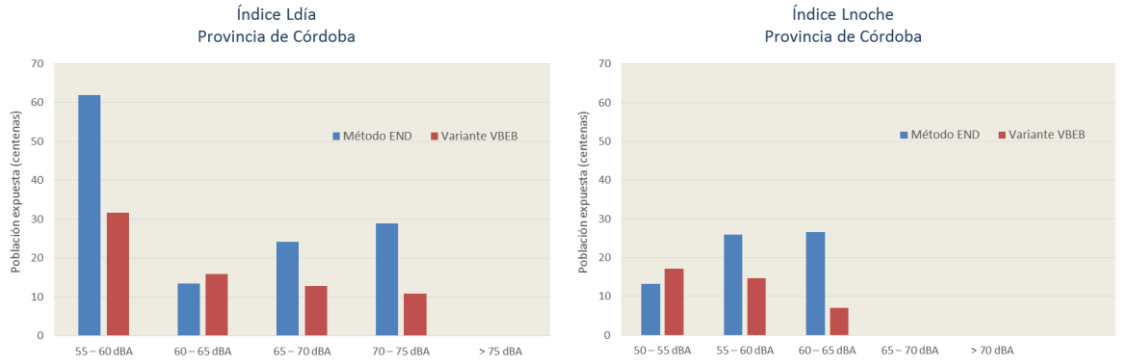



Figura 3 – Córdoba. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 302691 habitantes.

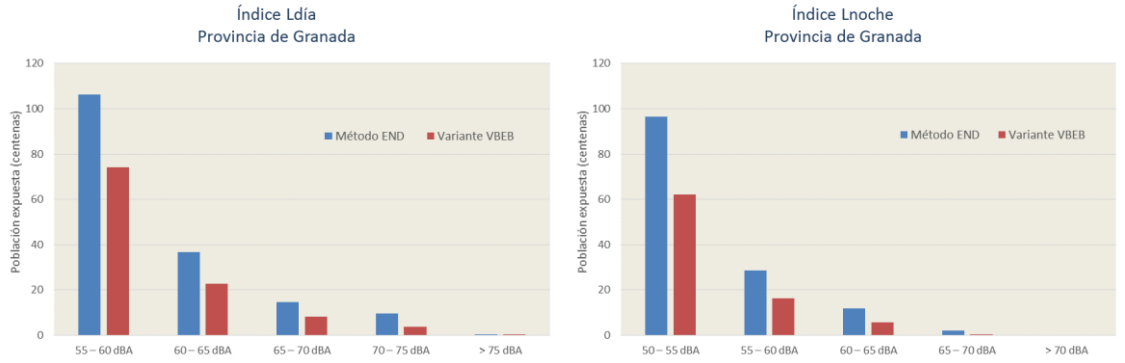



Figura 4 – Granada. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro

para una población evaluada de 424979 habitantes.

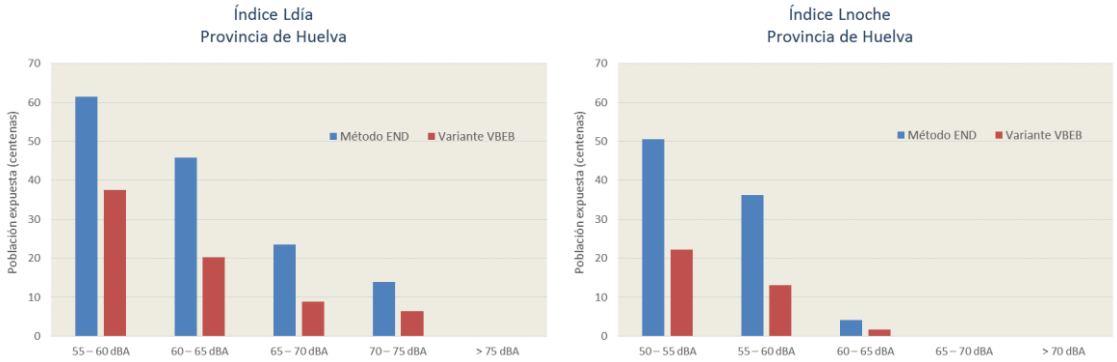



Figura 5 – Huelva. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 300193 habitantes.

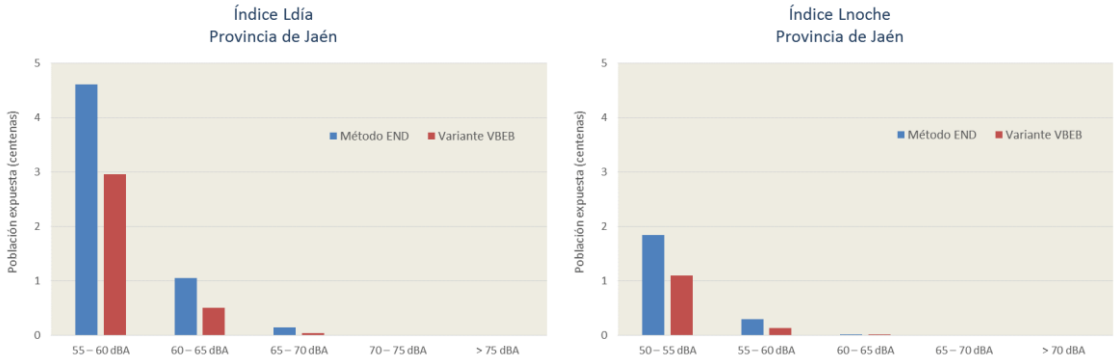



Figura 6 – Jaén. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 70518 habitantes.

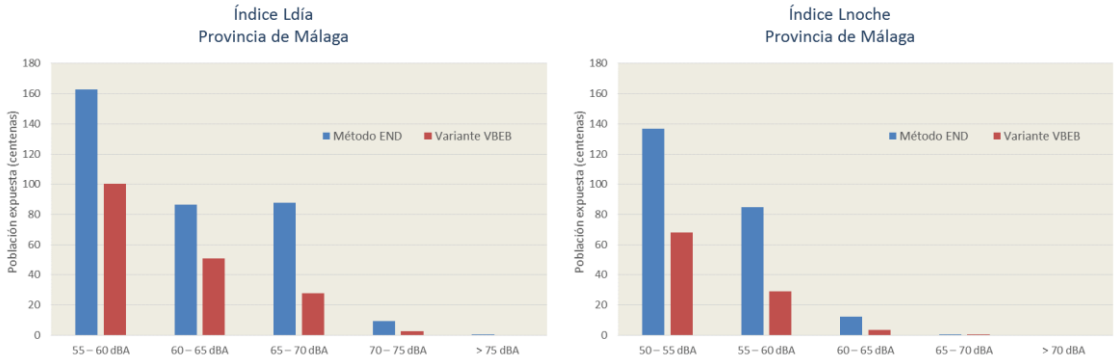



Figura 7 – Málaga. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro para una población evaluada de 678250 habitantes.

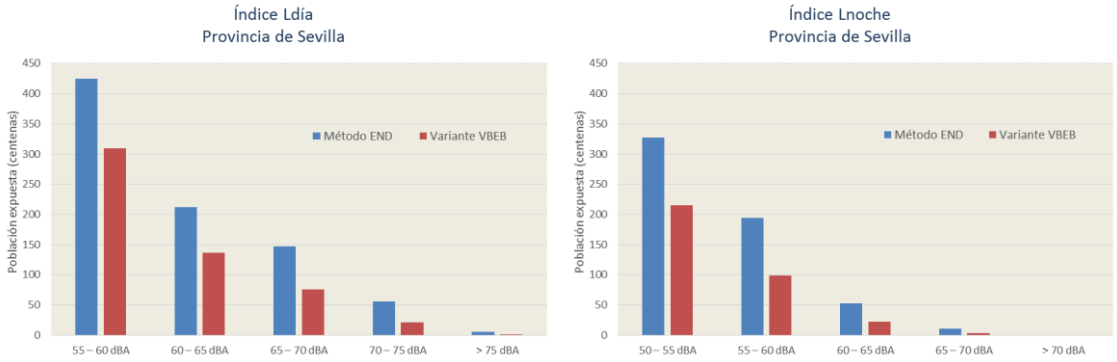



Figura 8 – Sevilla. Distribución de la población expuesta por intervalos de nivel sonoro

para una población evaluada de 1763721 habitantes.

## CONCLUSIONES

A continuación se muestran los datos más relevantes de los resultados de los MER en su 2ª Fase de la Red de Carreteras de Andalucía. La Figura 9 muestra los datos de población (en centenas) que se encuentra por encima de 65 dB(A) para los índices Ldía, Ltarde y Lden, y 55 dB(A) para el índice Lnoche, para los dos métodos de cálculo empleados.

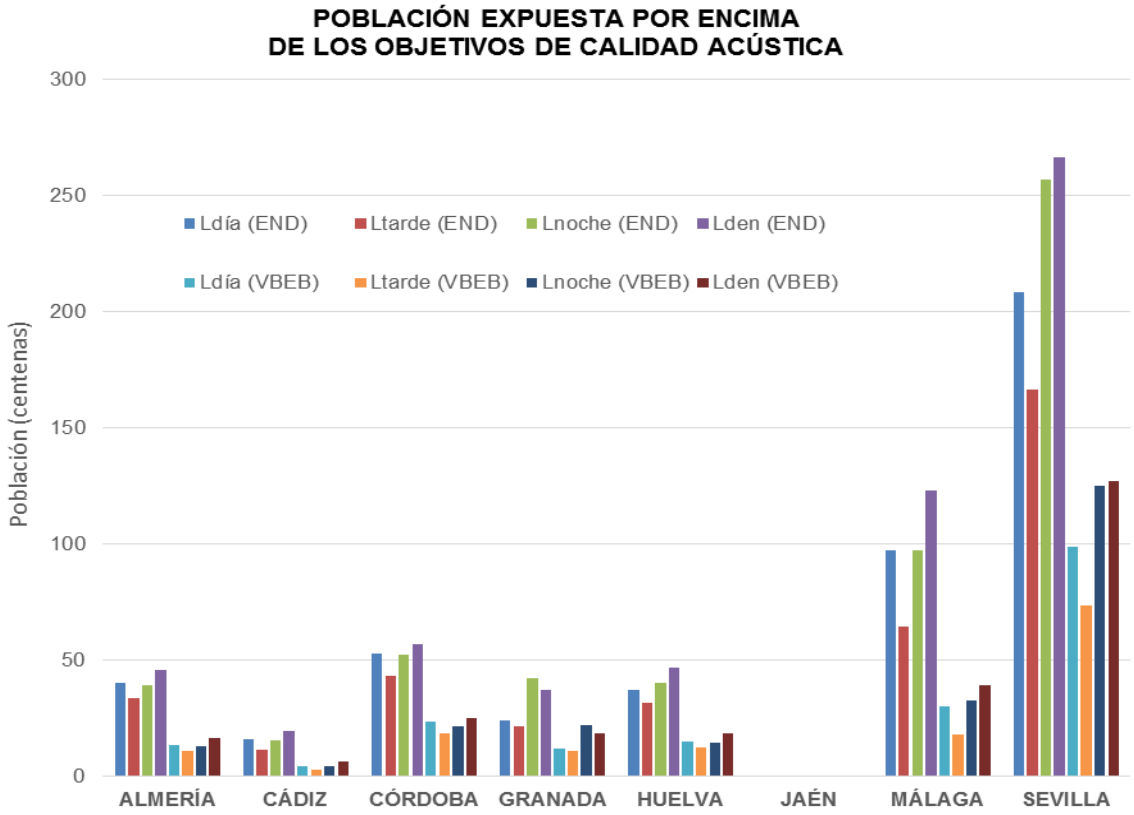



Figura 9 – Población expuesta a más de 65 dB(A) (Ldía, Ltarde y Lden) y 55 dB(A) (Ln) para los métodos END y VBEB.

En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de población expuesta por encima de los objetivos de calidad para áreas acústicas de tipo “a) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial” [3] [4] respecto a la población evaluada para los dos métodos de cálculo.

| | % Población expuesta respecto a la evaluada - Método END | | | % Población expuesta respecto a la evaluada - Método VBEB | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ldía | Ltarde | Lnoche | Ldía | Ltarde | Lnoche |
| ALMERÍA | 1,76 | 1,48 | 1,72 | 0,60 | 0,49 | 0,58 |
| CÁDIZ | 0,37 | 0,26 | 0,36 | 0,10 | 0,06 | 0,11 |
| CÓRDOBA | 1,75 | 1,43 | 1,73 | 0,78 | 0,61 | 0,72 |
| GRANADA | 0,57 | 0,52 | 1,00 | 0,28 | 0,26 | 0,53 |
| HUELVA | 1,25 | 1,06 | 1,34 | 0,51 | 0,42 | 0,49 |
| JAÉN | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,02 |
| MÁLAGA | 1,43 | 0,96 | 1,43 | 0,45 | 0,27 | 0,48 |
| SEVILLA | 1,18 | 0,94 | 1,45 | 0,56 | 0,42 | 0,71 |

Tabla 3 – Porcentajes de población expuesta por encima de los objetivos de calidad acústica.

En la Tabla 4 se presentan los datos de población expuesta a valores de Lnoche superiores a 55 dB(A) por km de carretera evaluada y provincia. Se comparan los cálculos de los dos métodos empleados. Se observa como es en la provincia de Córdoba donde se encuentra el mayor ratio población afectada/km evaluado.

| | Población expuesta a más de 55 dB(A) Lnoche por km de carretera | |
|---|---|---|
| | Método END | Método VBEB |
| ALMERÍA | 21 | 7 |
| CÁDIZ | 7 | 2 |
| CÓRDOBA | 242 | 100 |
| GRANADA | 17 | 9 |
| HUELVA | 37 | 13 |
| JAÉN | 1 | 0 |
| MÁLAGA | 51 | 17 |
| SEVILLA | 83 | 41 |
| ANDALUCÍA | 41 | 18 |

Tabla 4 – Población expuesta por km de carretera para el índice Lnoche

En la Tabla 5 se muestran los edificios sensibles expuestos a diferentes valores del índice Lden para cada una de las provincias de Andalucía.

| | Edificios sensibles expuestos para el índice Lden | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Tipo de centro | >55 | >65 | >75 |
| ALMERÍA | Sanitario | 2 | 1 | 0 |
| | Colegio | 11 | 0 | 0 |
| CÁDIZ | Sanitario | 2 | 1 | 0 |
| | Colegio | 9 | 1 | 0 |
| CÓRDOBA | Sanitario | 1 | 0 | 0 |
| | Colegio | 12 | 6 | 0 |
| GRANADA | Sanitario | 7 | 2 | 0 |
| | Colegio | 20 | 6 | 0 |
| HUELVA | Sanitario | 4 | 1 | 0 |
| | Colegio | 12 | 5 | 0 |
| JAÉN | Sanitario | 1 | 0 | 0 |
| | Colegio | 2 | 0 | 0 |
| MÁLAGA | Sanitario | 5 | 2 | 0 |
| | Colegio | 25 | 9 | 0 |
| SEVILLA | Sanitario | 12 | 2 | 0 |
| | Colegio | 57 | 18 | 0 |

Tabla 5 – Edificios sensibles expuestos a diferentes valores del índice Lden.

En la Tabla 6 se muestra la superficie expuesta a diferentes valores del índice Lden para cada una de las provincias de Andalucía.

| | Superficie expuesta para el índice Lden ($km^2$) | | |
|---|---|---|---|
| | >55 | >65 | >75 |
| ALMERÍA | 64 | 15 | 3 |
| CÁDIZ | 112 | 26 | 5 |
| CÓRDOBA | 8 | 2 | 0 |
| GRANADA | 163 | 40 | 10 |
| HUELVA | 42 | 10 | 1 |
| JAÉN | 18 | 5 | 1 |
| MÁLAGA | 97 | 24 | 5 |
| SEVILLA | 171 | 42 | 9 |

Tabla 6 – Superficie expuesta a diferentes valores del índice Lden.

Como se ha podido observar en todos los gráficos y tablas presentadas, existen grandes diferencias según el método de cálculo empleado. Como ya se ha demostrado anteriormente [5] [6], el método propuesto por la Directiva END se aleja considerablemente, por sobreestimación, de los datos proporcionados por la variante del método VBEB (evaluación a todas las alturas), que son más próximos a la realidad acústica existente.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se encuentra cofinanciado por la Unión Europea, con cargo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Queremos mostrar nuestro agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, con especial atención a la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía por su confianza y apoyo en el desarrollo del mismo.

.

## REFERENCIAS

[1] Directive 2002/49/EC of the European parliament and of the council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

[2] Vorläufige Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm (VBEB) (preliminary calculation method for determining the exposure figures caused by environmental noise). Gaceta Federal Alemana Nº 75 de 20 de Abril de 2007.

[3] REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

[4] DECRETO 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía, y se modifica el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética.

[5] Arana, M.; et al. ¿Cómo evaluar la población afectada por el ruido ambiental? TecniAcústica 2009. Cádiz.

[6] Gaetano Licitra; et al. Comparative analysis of methods to evaluate noise exposure and annoyance of people. ICA 2010. Sydney.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

# ON THE USE OF THE BEM TO STUDY THE NOISE EMITTED BY CIRCULATING EVS OR HVS IN URBAN ENVIRONMENT

PACS:43.50.Lj, 43.28.Js

Alba Sánchez-Milan[1], Jesus Carbajo[2], Luís Godinho[3], Ramon Peral-Orts[1], Jaime Ramis-Soriano[2]

[1]Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía, Universidad Miguel-Hernandez, Elche, España

{albasanchezmilan@gmail.com, ramon.peral@umh.es}

[2]Departamento de Física, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España

{jesus.carbajo@ua.es, jramis@ua.es}

[3]ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
{lgodinho@dec.uc.pt}

## ABSTRACT

Existing literature addressed the problem of near-field sound emission from electrical and hybrid vehicles, which is of significant importance since it is the means of identifying the presence of these vehicles by visually impaired persons. Its simulation may be done using different methods, and it is crucial to include details such as the directivity of the sound source emitting warning sounds or Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS). In this paper, the “ACA-BEM”, complemented with adequate Green’s functions, is used to conduct numerical studies regarding the effect of the AVAS in open street and in street with a lateral rigid wall configurations, and in the presence of other vehicles (acting as barriers).

## RESUMO

Algumas publicações técnico-científicas abordam o problema da emissão sonora de campo próximo de veículos elétricos e híbridos. Esta emissão é de grande importância, uma vez que é o meio de identificar a presença desses veículos por pessoas com deficiência visual. A simulação do comportamento destes veículos pode ser feita usando métodos diferentes, e é crucial para incluir detalhes como a diretividade da fonte Sonora que emite ruídos de alerta do veículo ou Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS). Neste trabalho, o "ACA-BEM", complementado com funções de Green adequadas, é utilizado para conduzir estudos numéricos sobre o efeito do AVAS em configurações abertas e numa rua com uma parede rígida laterais, e na presença de outros veículos (actuando como barreira).

## INTRODUCTION

It is known that, at low speed, Electric Vehicles (EVs) produce very little noise, as compared to gasoline or diesel engine cars. The noise level difference between an electric vehicle and one with an Internal Combustion Engine (ICE) can be as large as 6 dB(A) at 10 km/h, but this

difference becomes smaller at higher speeds. Above approximately 40 km/h, both types of cars are equally loud, because tire noise becomes the most important noise source. In an urban environment, the low sound level emitted at low speeds masked by ambient and traffic noise, makes it more difficult for pedestrians – and much more dramatically for visually impaired ones - to detect an approaching electric vehicle. This was demonstrated by Garay-Vega et al. [1] in a laboratory experiment. Forty-eight visually-impaired participants were surveyed with binaural recordings of conventional or electric vehicles approaching at low speeds (6 mph), in two kinds of background noise, differing in level (31 or 50 dB(A)). They had to detect the approaching car and made their response by pressing a computer key. Results indicated a higher number of missed detections for the electrically driven cars. Also, subjects detected ICE vehicles sooner than the EVs: the difference amounting to as much as 1.5 seconds. At 10 km/h, ICE vehicles were detected at a safe distance (more than 10 m away). In contrast, the electric vehicle was detected only a few meters from the pedestrian, and this can be quite dangerous for a pedestrian intending to cross a road. Indeed, several studies are found in the literature regarding the problem of vehicle detection by visually impaired persons, such as in the work of Verheijen et al [2], Goodes et al [3] or Mendonça et al [4].

In order to prevent this increased risk, manufacturers use, or plan to use, additional warning sounds, emitted by a loudspeaker attached to the front bumper or the wheel arch. Some specifications for these warning sounds already exist. As an example, the U. S. National Highway Traffic Safety Administration recommends values for the frequency bandwidth and sound level of such signals and a similar regulation is currently being prepared by the European authorities. This last project defines acceptable warning sounds in a surprisingly vague manner: they should sound “similar to the sound of a vehicle of the same category equipped with an internal combustion engine and the sound level may not exceed the sound level of a similar internal combustion engine vehicle”. The loudspeakers should deliver a broadband acoustic image, which enables pedestrians to localize the car by the sounds produced. The main frequencies of the warning sounds should be within 200-1000 Hz and no sound should be emitted below 100 Hz. The optimal sound system for electric and hybrid vehicles include three to four speakers- one in each corner of the car- but in principle, two loudspeakers would be sufficient as long as one directs sound forward and one backwards. To obtain the best directional characteristics the loudspeakers should not be hidden in cavities inside the car body but should be able to radiate freely in the wanted directions. However, particular patterns of sound propagation may be observed in urban environments, for example when nearby reflecting surfaces exist, further contributing to the formation of a complex sound field.

This background information clearly indicates the necessity of performing in-depth research regarding the use of standardized AVAS in electric and hybrid vehicles. In this paper, a contribution for discussion of this behaviour is given, in the form of a numerical simulation of the sound field produced by a simple vehicle, under different scenarios. In terms of the urban environment, both an open street and a street with a lateral rigid wall are considered. Regarding the vehicle, two scenarios are considered in terms of loudspeaker distribution, with one or two front-placed speakers. Complementarily, the effect of an obstacle (parked vehicle) is also analyzed, introducing further complexity in the sound propagation patterns. The selected numerical method is the Boundary Element Method, which is particularly well suited for acoustic problems, in which usually an extensive propagation medium exists around the radiating sources. However, standard BEM formulations can pose significant limitations regarding problem size, and special strategies must be used whenever larger problems need to be analyzed. In the present work, an Adaptive-Cross-Approximation algorithm is used, as described in [5], and previously applied by the authors in [6].

## THEORETICAL FORMULATION

### Governing equations

The propagation of sound within a three-dimensional space can be mathematically represented in the frequency domain by the Helmholtz partial differential equation as:

$$\nabla^2 p + k^2 p = -\sum_{k=1}^{NS} Q_k \delta\left(\xi_k^f, \xi\right) \tag{1}$$

where $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ , $p$ is the acoustic pressure, $k = \omega/c$ , $\omega = 2\pi f$ , $f$ is the frequency, $c$ is the sound propagation velocity within the acoustic medium, $NS$ is the number of sources in the domain, $Q_k$ is the magnitude of the existing sources $\xi_k^f$ located at $\left(x_{\xi_k^f}, y_{\xi_k^f}, z_{\xi_k^f}\right)$ , $\xi$ is a domain point located at $\left(x_\xi, y_\xi, z_\xi\right)$ and $\delta\left(\xi_k^f, \xi\right)$ is the Dirac delta generalized function.

In the above defined Helmholtz equation, the Sommerfeld radiation condition $\lim_{x\to 0}\left[\partial p(X)/\partial n - ikp(X)\right] = 0$ is automatically satisfied at infinity, where $X$ is the field point located at $(x, y, z)$, $n$ is the unit outward normal vector and $i = \sqrt{-1}$.

Considering that a point source is placed within this propagation domain, at $X_0 = (x_0, y_0, z_0)$, it is possible to establish the fundamental solution for the sound pressure at a point $X$ , at a distance $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ , which can be written as:

$$G(\xi, X) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \tag{2}$$

**Definition of Green's function using image-sources**

In an acoustic analysis, the presence of perfectly reflecting plane surfaces can be taken into account by using the well-known image-source method. In this technique, the effect of a point source in the presence of a given plane surface can be simulated by considering an additional virtual source, positioned in a symmetrical position with respect to the reflecting plane. Thus, following, for example, [6] if such plane is defined by $z = 0$, the corresponding Green's function can be written as:

$$G_{half}(\xi, X) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} + \frac{e^{-ikr_1}}{4\pi r_1} \tag{3}$$

where $r_1 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2}$ . The above expression is only valid if the plane is perfectly rigid, with a reflection coefficient of 1.

**Boundary Element Method formulation**

According to Green's Second Identity, Eq. 0 can be transformed into the following Classic Boundary Integral Equation (CBIE):

$$C(\xi)\, p(\xi) = -i\rho\omega \int_\Gamma G(\xi, X)\, v_n(X) d\Gamma - \int_\Gamma \frac{G(\xi, X)}{\partial n}\, p(X) d\Gamma + \sum_{k=1}^{NS} Q_k G\left(\xi_k^f, \xi\right) \tag{4}$$

where $\Gamma$ is the boundary surface, $\rho$ is the medium density, $G\left(\xi_k^f, \xi\right)$ is the incident field regarding the acoustic pressure generated by the real source placed at position $\xi_k^f$ ; $p(X)$ and $v_n(X)$ represent the acoustic pressure and the normal component of the particle velocity at $X$ , respectively. The coefficient $C(\xi)$ depends on the boundary geometry at the source point, and equals 0.5 for a smooth boundary.

For the case of exterior problems, it is known that equation (4) provides unstable solutions at certain frequencies. Strategies have thus been developed in order to avoid this significant drawback, namely by means of its combination with the so-called Hypersingular Boundary Integral Equation (HBIE). To obtain this second equation, the first derivative with respect to the normal direction at the source point, $n_L$ , must be considered, and the following equation arises:

$$-i\rho\omega\tilde{C}\,(\xi)v_n(\xi) = -i\rho\omega\int_\Gamma \frac{\partial G(\xi,X)}{\partial n_L} v_n(X)d\Gamma - \int_\Gamma \frac{\partial G(\xi,X)}{\partial n_L \partial n}\, p(X)\, d\Gamma + \sum_{k=1}^{NS} Q_k \frac{\partial G\left(\xi_k^f,\xi\right)}{\partial n_L} \tag{5}$$

As before, the coefficient $\tilde{C}(\xi)$ depends on the boundary geometry at the source point, and equals 0.5 for a smooth boundary.

It has been proposed by Burton and Miller [**Erro! Marcador não definido.**] that combining the two equations (4) and (5) in the form

$$CBIE + \mathrm{i}/k\ HBIE = 0 \tag{6}$$

originates a new boundary integral equation which provides unique solutions at all frequencies. Different boundary conditions may be prescribed at each boundary element, such as Dirichlet ( $p(X) = \overline{p}(X)$ ), Neumann ( $v(X) = \overline{v}(X)$ ) or Robin ( $p(X)/v(X) = \overline{Z}(X)$ , being $\overline{Z}(X)$ the acoustic impedance) boundary conditions. After prescribing such conditions, discretizing the boundary into $NE_B$ segments, and establishing adequate interpolation functions within each segment (constant interpolation in the present work), a system with $NE_B$ equations on $NE_B$ unknowns can be assembled. Its solution makes it possible to obtain the acoustic pressure and the normal velocity at each boundary element, and consequently the pressure at any point of the domain can be computed by applying the boundary integral Eq. (4).

**Adaptive Cross Approximation formulation**

The Adaptive Cross Approximation (ACA) is based in hierarchical matrices (*H* matrices), an approach that allows for matrix operations with almost linear complexity. These matrices may be understood as an algebraic structure reflecting a geometrically motivated partitioning into sub-blocks, that in turn are classified to be either admissible or not. This block structure points out the fact that the H-matrix arithmetic is easily parallelizable. After having concluded the setup of each block, admissible blocks have to be approximated. The main advantage of ACA is that, for such approximation, it only requires the evaluation of some original matrix entries and the approximation is still almost optimal. Having a matrix $A \in C^{t\times s}$ , the approximation is obtained as follow:

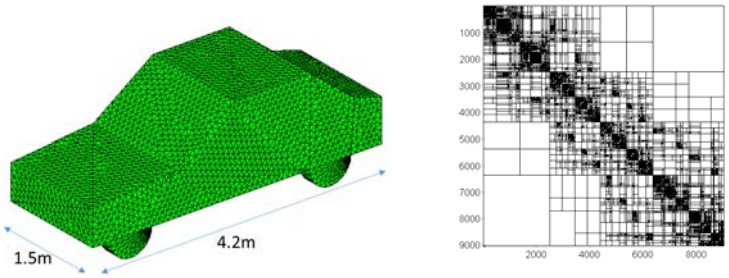
$$A \approx S_k = UV^T \tag{6}$$

where $U \in C^{t\times k}$ and $V \in C^{s\times k}$ . In this approximation $k$ has a smaller rank when compared with $t$ and $s$ . This low-rank approximation can be obtained only for well-separated computational domains $x \neq y$ .

To exploit the full advantages of such approach, it becomes necessary to solve the corresponding equation system by means of an iterative solver. In the present work, the Generalized Minimal Residual Method (GMRES) iterative solver has been used, together with a block preconditioner (to accelerate convergence) based on the non-admissible blocks of the matrix.

**NUMERICAL RESULTS**

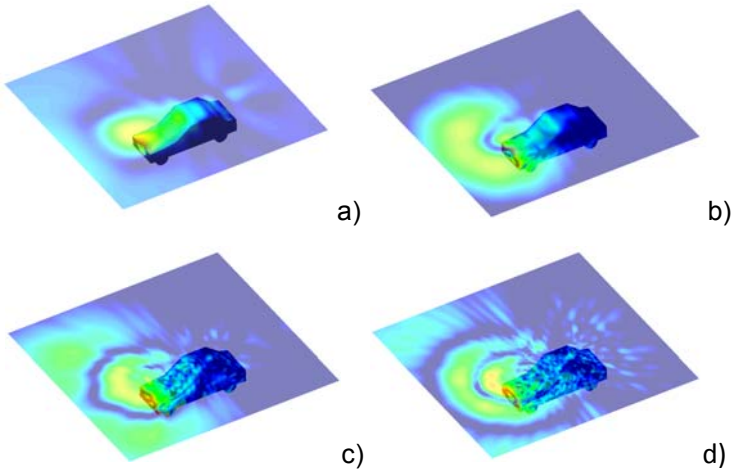
In a first set of examples, let us consider a simple vehicle emitting a warning sound from a single frontal loudspeaker in an open street. The adopted vehicle geometry is only illustrative, and is depicted in Figure 1a. The assemblage of the BEM system matrix is performed as described in the previous section, considering an ACA algorithm, in which admissible blocks are greatly compressed. Figure 1b illustrates the hierarchical matrix constructed for this purpose, where white patches correspond to admissible blocks (composing the vast majority of the matrix). Comparing BEM and ACA-BEM memory requirements, it can be stated that in ACA-BEM the required memory is reduced to 35%.




a) b)

Figure 1: Discretized vehicle using 9056 triangular boundary elements (a) and corresponding ACA-BEM hierarchical matrix representation (b).

For this geometry, sound pressure levels have been calculated considering the single loudspeaker to be placed in the front part, centered with the vehicle. In Figure 2, the sound pressure level in a plane parallel to the ground is illustrated for 250Hz, 500Hz, 750Hz and 1000Hz. It is clear that the increasing excitation frequency originates more intricate SPL maps, with the interaction between direct sound waves and the various reflections being responsible for this complexity. In addition, regions with very low SPL are visible at varying distances, which are generated by the interference between the direct waves and the first reflection on the rigid ground.



a) b)

c) d)

Figure 2: Results for 250Hz (a), 500Hz (b), 750Hz (c) and 1000 Hz (d). Color scale from 15 dB (dark blue) to 75 dB (dark red).

To have a better and clearer view of the observed behavior, polar plots are depicted in Figure 3, considering a distance from the front of the vehicle of 10 m, and for receivers placed 1.6 m above the ground. As stated in the introduction, the distance of 10 m can be considered as the minimum safe distance for vehicle detection by pedestrians, and thus is worth a more detailed analysis.

The polar plots in Figure 3 evidence a distinct directivity pattern, varying with the excitation frequency. For lower frequencies, in spite of the presence of the rigid vehicle shadowing the source, relatively high SPL is reached for all angles, although with somewhat higher values in the front part (a difference of 5 to 10 dB). For the higher frequencies, and as in Figure 2, a more complex behaviour is observed. It is interesting to note for the frequency of 750 Hz a very significant distinction between the front and rear parts of the vehicle, with energy being more concentrated in the front part, as expected.

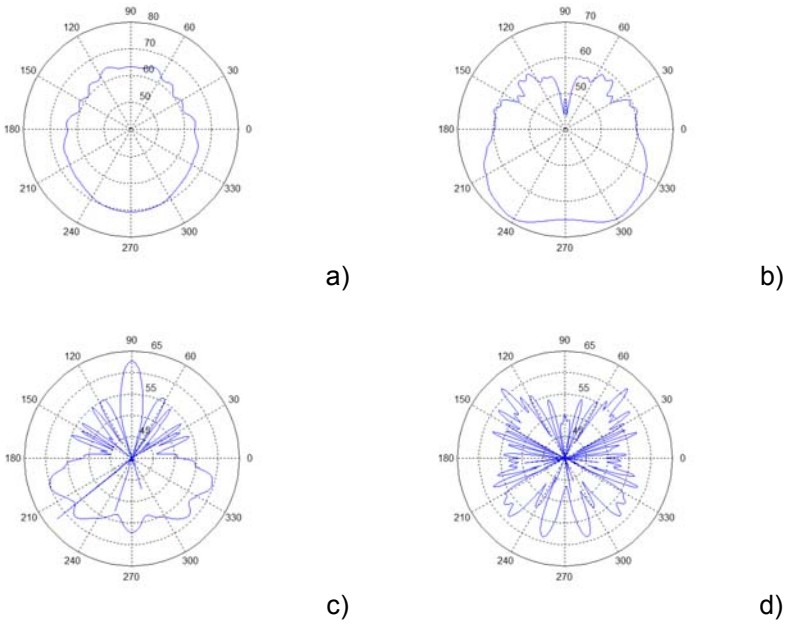



Figure 3: Polar plots for 250Hz (a), 500Hz (b), 750Hz (c) and 1000 Hz (d).

It is important to note that, in the previous simulations, the emitting source was assumed to be a point source placed near the front panel of the vehicle, approximately 0.1 m away from it. Since this is not an exact representation of the real scenario, a second set of simulations was performed embedding this source within the frontal panel, introducing a small semi-spherical cavity where the source is located. A detailed view of the corresponding BEM mesh is depicted in Figure 4a, and the computed polar plots, indicating the directivity of the system, are illustrated in Figure 4b, for a frequency of 750Hz. Comparing with the plots of Figure 3, some differences are visible, in particular in the rear part of the vehicle, where less energy seems to be arriving; by contrast, in the front part, an increase in the SPL is visible, and was to be expected due to the more intense shadowing/baffle effect originated by the cavity where the source is now placed. Remarkably, the main features of the directivity plot in the frontal part are almost exactly maintained, indicating that, for the purpose of evaluating the effect of the source in the front region, using the simpler approach of Figure 1 can be sufficient.

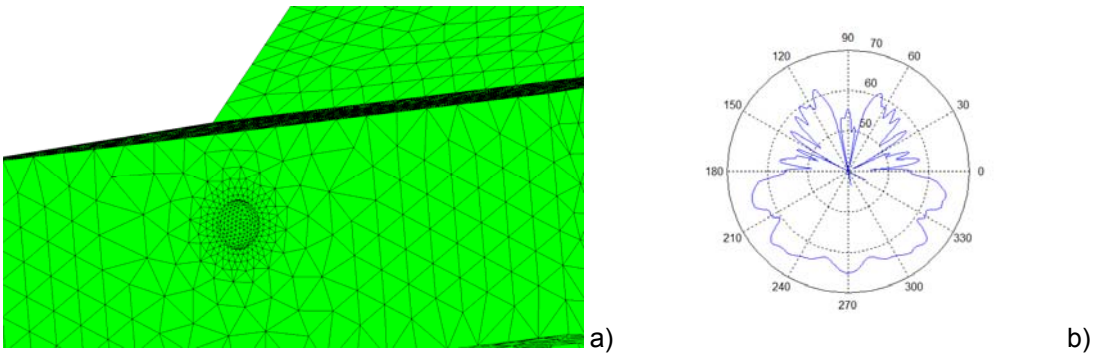
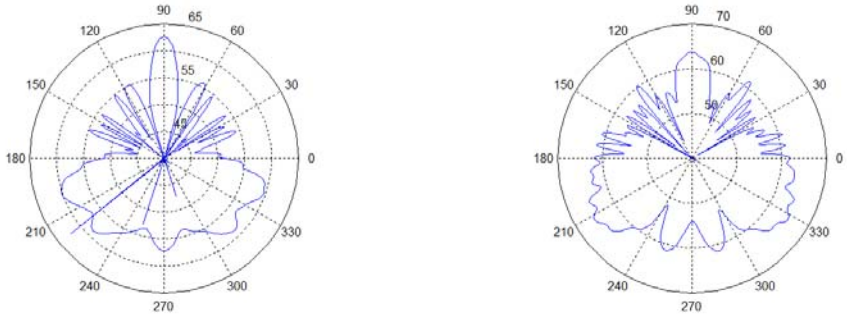



Figure 4: Effect of considering the source embedded in the front panel: (a) detailed view of the BEM mesh and (b) polar plot for a frequency of 750 Hz.

In the previous examples, a single emitting speaker was considered in the front of the vehicle. However, it has been proposed by different researchers that better detectability may be obtained if more sources are placed emitting the warning sound. In the plot of Figure 5, the directivity pattern is compared in polar plots for situations with one and two acoustic sources emitting noise in the frontal part of the vehicle. As expected, the polar plot for the latter case indicates a more dense concentration of energy in front and to both sides of the vehicle; indeed, it is interesting to note that the directivity plot exhibits two broad lobes, one to each side of the

vehicle, where significant and homogenous SPLs are attained, indicating that a significant area is illuminated by the emitting system.

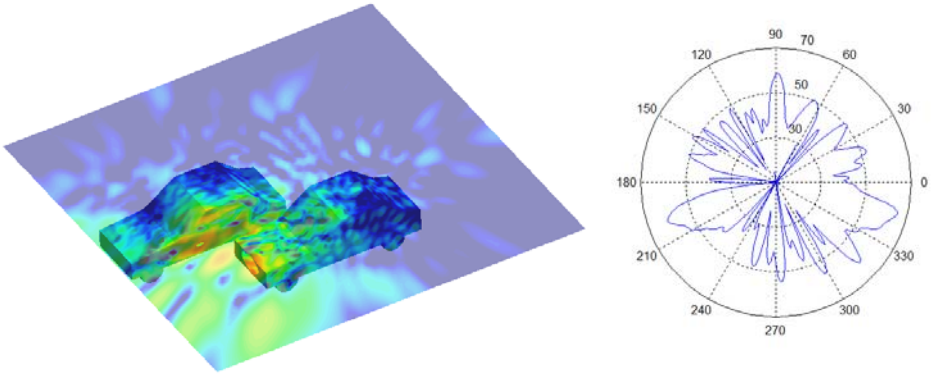



a) b)

Figure 5: Effect of one (a) or two (b) emitting sources in the front part of the EV, for 750Hz.

In what follows, two distinct situations, usually occurring in an urban environment, are considered, namely the presence of a parked car (obstacle) and the presence of a rigid wall parallel to the street.

Let us start by analyzing the effect of a right-sided parked vehicle, acting as a barrier to the propagation of the warning sounds emitted by the AVAS. Figure 6 illustrates both the SPL and the directivity polar plot for such situation. The SPL color map of Figure 6a clearly indicates the existence of a shadow effect behind the parked vehicle, which, in practice, acts as a barrier to the propagation of sound waves. Observing the polar plot in Figure 6b, this effect is clearly seen, with a significant decrease of the energy reaching the region where pedestrians circulate. Although this decrease is largely dependent on the relative position of the two vehicles, the presented result gives a clear indication regarding a potential acoustic shadowing effect that may decrease detectability of the EVs.




a) b)

Figure 6: SPL distribution (a) and polar plot (b) calculated in the presence of a parked car, for a frequency of 750Hz.

Results in Figure 7 refer to the last analyzed case, in which a rigid lateralwall is considered parallel to the street. Results for 750Hz and 1000Hz are illustrated. The results, presented in terms of SPL maps, indicate the presence of a reflected field coming from the rigid vertical wall. This reflection enriches the sound field and may slightly increase the detectability of the vehicles by pedestrians. However, it must be stressed that this second wave is traveling from a direction opposite to the car (from the wall side and not from the street side), and can thus induce some confusion as to where the vehicle is situated (particularly in the case of visually impaired people). This behavior merits a more in-depth study, and falls beyond the scope of the present paper.

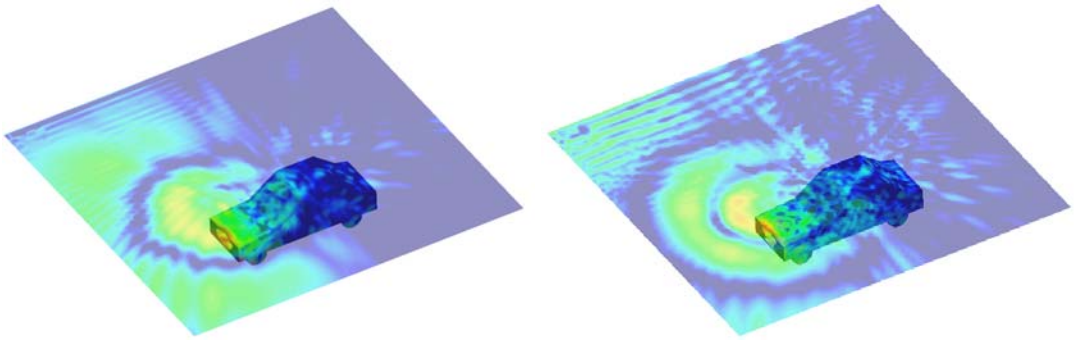


Figure 7: SPL distribution calculated in the presence of a rigid lateral wall, for frequencies of 750Hz (a) and 1000Hz (b).

## CONCLUSIONS

This paper presented a numerical approach to the study of the effect of AVAS used in electrical and hybrid vehicles. The “ACA-BEM”, complemented with adequate Green’s functions, is used to conduct the numerical studies considering open and straight-shaped configurations, and in the presence of other vehicles (acting as barriers). Although the objective of the paper is to illustrate the applicability of the numerical tool, it was also possible to draw interesting conclusions regarding the global acoustic behavior of the system. It was observed that the effects of parked vehicles and the urban configuration can greatly influence the capacity of pedestrians to detect circulating vehicles. To finish, it should be noted that further research in this topic is required, and objective quantification of the detectability of these vehicles merits further attention.

## ACKNOWNLEDGEMENTS

This work was carried out with funding from the General Directorate of Traffic, Spanish Minis-try of Interior, through the project whose reference is SPIP2014-01406 (Study and adequacy of warning sounds in electric vehicles).

## REFERENCES

[1] Garay-Vega, L., Hastings, A., Pollard, J. K., Zuschlag, M., & Stearns, M. D. Quieter cars and the safety of blind pedestrians: Phase I (No. HS-811 304), 2010.

[2] Verheijen, E. Jabben, J. Effect of electric cars on traffic noise and safety. Report 680300009/2010. National Institute for public Health and the Environment Netherlander 2010.

[3] Goodes, P., Bai Y. B., Meyer, E., Investigation into the Detection of a Quiet Vehicle by the Blind Community and the Application of an External Noise Emitting System. SAE International. 2009-01-21895. 2009.

[4] Mendonça, C., Freitas, E., Ferreira, J.P., Raimundo, I.D., Santos, J.A. Noise abatement and traffic safety: The trade-off of quieter engines and pavements on vehicle detection. Accident Analysis and Prevention Vol. 51, [11– 17], 2013.

[5] Liu Y. J., Mukherjee S., Nishimura N., Schanz, M., Ye, W., Sutradhar, A., Pan, E., Dumont, N. A., Fran-gi, A., Saez, A. Recent Advances and Emerging Applications of the Boundary Element Method. Appl. Mech. Rev., 64(3), 030802, 2012.

[6] Godinho, L., Amado-Mendes, P., Santos, P. G., Cordeiro, M. An efficient and accurate numerical model for the 3d analysis of sonic crystals. 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, 2015.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SOUND EFFECT DUE TO ELECTRIC VEHICLES IN THE NOISE MAPS

PACS: 43.50

H. Campello Vicente[1], E. Velasco Sánchez[1], N. Campillo Davó[1], R. Peral Orts[1],
Universidad Miguel Hernández de Elche
Av. Universidad s/n, 03202, Elche. España
Telf.: 96.522.2446 Fax: 966 658 928
E-mail: hcampello@umh.es

**ABSTRACT**

The electric vehicle is an increasingly consolidated reality, which in the future will vary the automotive landscape due to the silent features that follows these vehicles and should generate environmental benefits.

This paper compared the sound levels of electric vehicle with rolling noise values of different noise prediction models, with the objective of evaluate the future introduction of electric vehicles as a variable of urban noise maps.

**RESUMEN**

El vehículo eléctrico es una realidad cada día más consolidada, la cual en un futuro variará el panorama automovilístico debido a las características silenciosas que desprende estos vehículos en su circulación frente los sistemas de propulsión convencionales, que a priori, deberían generar ventajas medioambientales.

En este trabajo se han comparado los niveles de ruido del vehículo eléctrico con los valores de ruido de rodadura de diferentes modelos de predicción de ruido, con la intención de valorar la futura introducción como variable en los mapas de ruido.

## 1. ANTECEDENTES

El vehículo eléctrico es una realidad dentro del mercado automovilístico, aunque se necesitarán unos años para que esta nueva tendencia tenga una representación significativa en las calles de nuestras ciudades.

El aumento de la presencia de vehículos eléctricos junto a la necesidad de actualizar los mapas de ruido según la vigente Directiva Europea 2002/49/CE [1], genera la necesidad de adaptar los modelos de predicción de ruido de tráfico rodado a esta nueva variable de los mapas sonoros.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de introducir vehículos eléctricos dentro del caudal de tráfico de un mapa sonoro, evaluando las variaciones generadas por este modo de propulsión “alternativo” en las calles de nuestras ciudades.

## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO

La metodología llevada a cabo para obtener los objetivos planteados ha sido desarrollada mediante varios puntos diferenciados:

- Estudio del vehículo eléctrico como fuente de ruido.
- Estudio de los modelos de predicción sonora basada en el ruido de tráfico rodado
- Generación e implementación del vehículo eléctrico en los modelos.

El punto de partida de los modelos de predicción de ruido de tráfico rodado es el vehículo de forma individual, por tanto es necesario realizar una caracterización sonora de los vehículos de propulsión eléctrica para iniciar el desarrollo de la inclusión de éstos en cualquiera de los estándares de predicción sonora basados en el tráfico rodado.

Es evidente pensar que en este caso la mejora reside en la eliminación del ruido motor, pero cabe recordar que el ruido motor deja de ser predominante a partir de los 35km/h [2], por tanto en determinadas ocasiones éstos nuevos vehículos perderán la consideración de “silenciosos”. Por lo tanto se intuye que si el ruido generado por el motor desaparece, las fuentes de ruido principales del vehículo eléctrico serán: el ruido de rodadura y el ruido aerodinámico.

Para tomar esta consideración de una forma fiable se realizaron mediciones experimentales (sobre vehículos convencionales y eléctricos) basadas en las premisas expuestas en la Directiva 2001/43/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [3] y la ISO 11819-2 " Método para medir la influencia de las superficies de la carretera en el ruido del tráfico” [4]. Al seguir estos procedimiento se emulo el paso de un vehículo por una vía registrando valores a una distancia suficientemente alejada para no registrar reflexiones directas (7,5m y una altura de 1,2m), asumiendo a su vez las condiciones de propagación que aparecerían en cualquier mapa sonoro con la salvedad de realizar los ensayos en un entorno controlado.

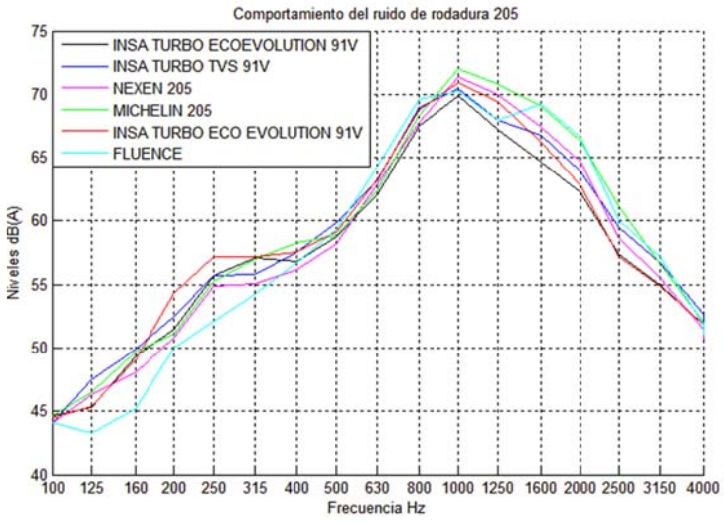



Figura 1.Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 205 frente a un vehículo eléctrico

Una vez obtenidos los datos fue posible la caracterización del ruido generado por el vehículo eléctrico [5], así como plantear la introducción de una nueva variable en los modelos de predicción sonora que cuantifique la aportación de estos vehículos asumiendo únicamente la rodadura como fuente de ruido.

Tras estudiar la generación de ruido en los vehículos eléctricos, se ha evaluado la metodología mediante la cual los modelos de predicción de tráfico rodado cuantifican los niveles en sus algoritmos. En este caso se ha centrado el estudio sobre el Método Oficial Francés de predicción de ruido NMPB-ROUTES 2008 [6] por su aceptación internacional, así como por ser el método empleado en España debido a la carencia de un modelo de predicción de ruido propio.

El Método de Predicción Francés está compuesto por 2 submodelos, modelo fuente y modelo de propagación, e independientemente de los submodelos que compongan el conjunto total, éste sigue las siguientes etapas para realizar el cálculo de los niveles de ruido:

1) Descomposición de las fuentes de ruido en fuentes puntuales de sonido.
2) Determinación del nivel de potencia acústica en cada punto.
3) Búsqueda el camino de propagación entre la fuente puntual y el receptor, existiendo diferentes caminos: directo, reflejado y difractado.
4) Cálculo de las atenuaciones debidas a las condiciones de contorno del modelo
5) Acumulación del nivel sonoro a largo plazo de cada trayectoria, para poder calcular el nivel sonoro total en un punto receptor.

En este caso la generación de la nueva variable que contemple el vehículo eléctrico como fuente de ruido debe ir implementada dentro del modelo fuente, en él se cuantifica el nivel de ruido generado por el caudal de vehículos al circular por una vía en función de la velocidad de circulación.

Los niveles de emisión se cuantifican a partir del ruido generado por una fuente lineal (en este caso la vía) a una distancia de referencia de 7,5 m.
El nivel de potencia acústica $L_{Awi}$ en dB(A) de una fuente elemental *i* dada, se obtendrá a partir de la siguiente expresión [7]:

$$\boldsymbol{L_{Awi} = 10 * \log_{10}\left((E_{vl} + 10 * \log_{10} Q_{vl}) + \left(E_{vp} + 10 * \log_{10} Q_{vp}\right)\right) + 10 * \log_{10} l_i + R(j)} \quad \textbf{(1)}$$

Dónde:
$E_{vl}$ y $E_{vp}$ Son los niveles de emisión de ruido por hora, diferenciados en vehículos ligeros y pesados, respectivamente.
$Q_{vl}$ y $Q_{vp}$ Son el flujo de vehículos por hora de ligeros y pesados respectivamente.
$l_i$ Es la longitud en metros del segmento de la fuente lineal modelado mediante una fuente puntual i.

$$\mathbf{l_i = {}^{1}/_{2}\,(S_{i-1}S_i + S_iS_{i+1})} \quad \textbf{(2)}$$

$R(j)$ Es el valor del espectro de tráfico rodado normalizado a 0 dB con ponderación A.

Para la aplicación de una nueva variable asociada al vehículo eléctrico deben contemplarse los valores asociados a la nueva variable $E_{ve}$, la cual será dependiente del ruido generado por la rodadura así como por el tipo de superficie sobre la que circularía el vehículo .

| | LV | HGV |
|---|---|---|
| R1 | 49.4+21log(v/90) | 59.1+20log(v/80) |
| R2 | 53.4+20.1log(v/90) | 62.1+20log(v/80) |
| R3 | 55.9+21.4log(v/90) | 63.1+20log(v/80) |

Tabla 1. Valores de $\mathbf{L_{rodadura}}$ en función de la superficie de rodadura. [7]

Dónde:

a) Categoría **R1** bajo ruido (asfalto, en concreto de 0/6 y 0/10, siendo asfalto poroso 0/10),
b) Categoría **R2** ruido intermedio (mezcla fría, asfalto denso 0/10)
c) Categoría **R3** alto ruido (hormigón de cemento, tratamiento superficial 6/10 y 10/14, y asfalto concreto 0/14).

A partir de estos valores de referencia medidos a la distancia de 7,5m registrados según los ensayos Pass-By [4] se generaría la variable asociada al ruido del vehículo eléctrico quedando de forma simplificada el modelo fuente de la siguiente forma:

$$L_{Awi} = 10 * \log_{10}\left((E_{vl} + 10 * \log_{10} Q_{vl}) + (E_{vp} + 10 * \log_{10} Q_{vp}) + (E_{ve} + 10 * \log_{10} Q_{ve})\right) + 10 * \log_{10} l_i + R(j) \quad (3)$$

Al asumir estas modificaciones en sobre el modelo fuente original del método de predicción de ruido MNPB-ROUTES 2008, ha sido posible estudiar la contribución de la sustitución parcial o total del parque automovilístico por vehículos eléctricos.

El estudio de la repercusión de la propulsión eléctrica se ha realizado aplicando progresivamente un aumento del porcentaje de vehículos eléctricos sobre los caudales de vehículos registrados en las mediciones experimentales con las que se validó el modelo implementado. Esta inclusión ha sido gradual, restando el número de vehículos eléctricos al flujo de vehículos térmicos evitando que la suma total de vehículos exceda al caudal de tráfico original.

$$Q_{li} = Q_l - Q_e \qquad Q_e = N\% \cdot Q_l \quad (4)$$

En este trabajo se ha fijado una velocidad urbana de referencia para desarrollar el estudio de 30 km/h en base al trabajo desarrollado por J.M Calvo [8], según este trabajo la velocidad media de conductores "estándares" circulando en vías urbanas es aproximadamente de 29,4 km/h y una desviación típica de 15,2. Este trabajo se desarrolló sobre 20 conductores en un recorrido de 8.500 metros en los cuales se encontraban con 25 semáforos y 4 rotondas. A partir de aquí se centrará el estudio en las velocidades cercanas a 30 km/h asumiendo ésta como la velocidad urbana media.

El ejemplo presentado a continuación fue una de las mediciones estudiadas para validar el modelo implementado, esta es una vía de la ciudad de Elche sobre el cual circuló en el momento de la medición un flujo de tráfico aproximado de 1260 vehículos ligeros y 150 pesados en una hora a 30 km/h aprox.

En este caso se muestra como resultado la diferencia de niveles entre el caudal registrado y el simulado para incrementos de vehículos desde 0% (caudal actual) hasta el 100% de vehículos eléctricos, con unas condiciones de ruido de fondo simulado entorno a 45dB(A).

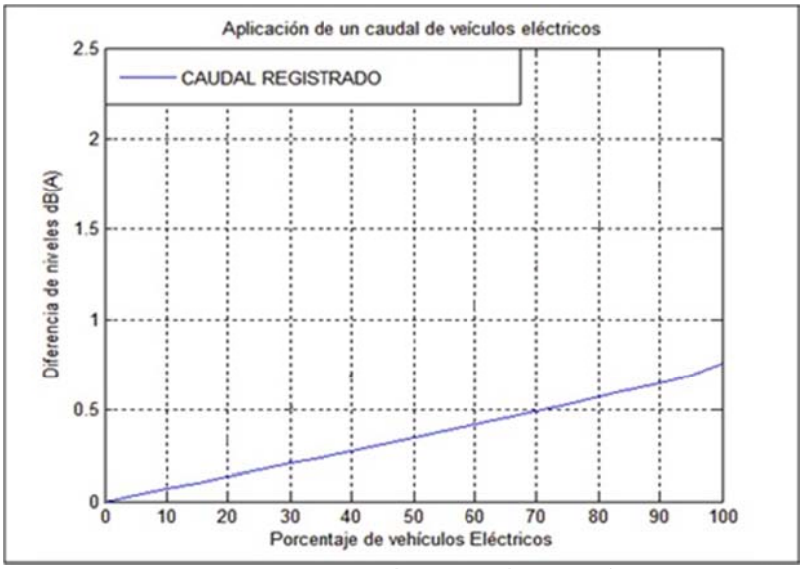



Figura 2. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en ciudad

Como se puede comprobar en la figura anterior, los niveles, a medida que van variando los caudales, descienden de manera lineal hasta llegar al 100% de eléctricos. El descenso en este caso es inferior a 1 dB, debido a que existe un porcentaje relativamente alto de vehículos pesados. En el caso de eliminar los vehículos pesados de la simulación el descenso de los niveles sería más relevante, 2 dB, debido a la gran aportación sonora de este tipo de vehículos.

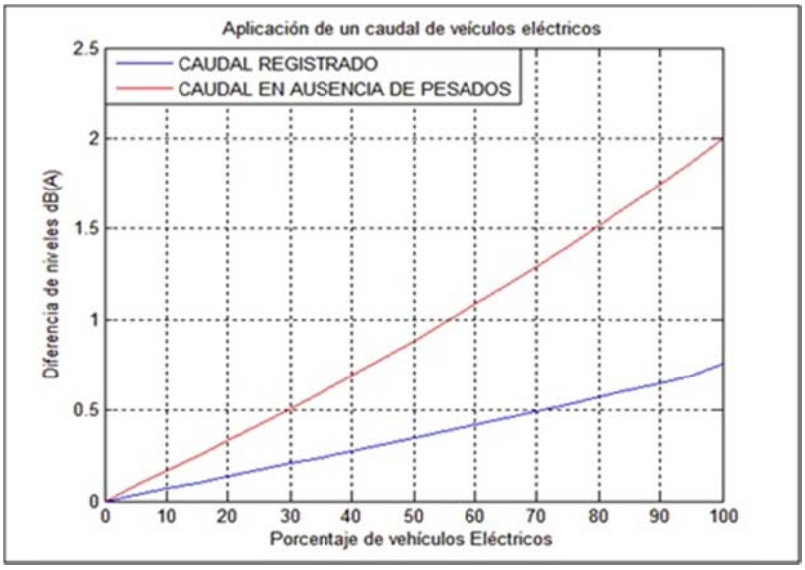



Figura 31. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en ciudad

Paralelamente a los resultados mostrados el Modelo Francés considera 3 tipos de condiciones de circulación “Constante, Acelerado y Decelerado”, pero en los mapas acústicos se emplearía la condición “Constante” a no ser que se estén estudiando casos puntuales como rotondas o viales de aceleración. Esta condición de constancia en el tráfico en una carretera ciertamente es algo que puede considerarse sin mayores problemas, en cambio en zonas urbanas es algo que para los mapas sonoros se estima como válido, no siendo algo que se ajuste a la realidad ya que en ciudad se suceden los cambios de orden de marcha.

En la irregularidad del tráfico será donde el vehículo eléctrico presentará mayores beneficios, en este trabajo se plantea como trabajo futuro la adaptación del modelo para la evaluar de cambios de orden de marcha en situaciones concretas como semáforos o cruces de vías buscando la comparación experimental con los resultados del modelo de predicción.

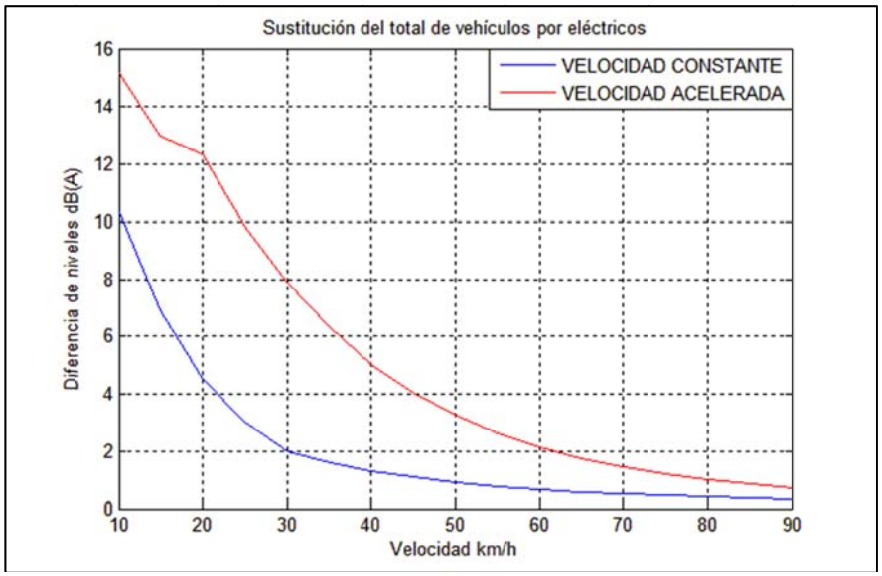



Figura 4. Diferencia de niveles máxima en función del tipo circulación

## 3. Conclusiones

Una vez estudiadas las consideraciones que el modelo contempla, puede llegarse a algunas conclusiones sobre las variaciones que el vehículo eléctrico puede generar en los mapas de ruido en un futuro.

Por un lado para altas velocidades la disminución de los niveles al introducir los vehículos eléctricos en el tráfico podría considerarse despreciable, pudiéndose contemplar la posibilidad de no diferenciar entre tipos de vehículos por ser un valor menor a 0,5 dB para velocidades por encima de 80km/h. En cambio para bajas velocidades, la ausencia del ruido generado por los motores favorece al descenso de los niveles de ruido observándose una reducción de 2 dB para una velocidad urbana media de 30km/h.

Cabe destacar que estos resultados son sensibles al ruido de fondo del punto de recepción, reduciéndose el beneficio del uso del vehículo eléctrico a medida que el ruido de fondo aumenta. Los resultados mostrados a lo largo de este se han basado en un ruido de fondo de 45dB y una distancia de recepción de 10 metros.

Tras el estudio llevado a cabo, una de las conclusiones extraída sería la reducción generada por el vehículo eléctrico según el orden de marcha frente a los mapas de ruido. En el caso de cambiar el punto de vista y observando la aportación sonora desde la perspectiva del ciudadano, la sensación de silencio si será más apreciable debido a que en ciudad la mayoría de los recorridos son a baja velocidad, con constantes paradas y arracadas.

## 4. Referencias

[1] DIRECTIVE 2002/49/CE of the European Parliament and Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

[2] SANDBERG, U.; EJSMONT, J.A. Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden, 2002.

[3] DIRECTIVA 2001/43/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de junio de 2001 sobre los neumáticos de los vehículos de motor y de sus remolques así como de su montaje.

[4] ISO 11819-2, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.

[5] CAMPELLO, H; CAMPILLO, N; PERAL, R; VELASCO, E. Caracterización Sonora de un vehículo eléctrico. XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Málaga 2014.

[6] DUTILLEUX, G.; DEFRANCE, J.; ECOTIÈRE, D.; GAUVREAU, B.; BÉRENGIER, M.; BESNARD, F. DUC, E.L. NMPB-Routes-2008: The Revision of the French Method for Road Traffic Noise Prediction, Acta Acustica united with Acustica. 96 (2010) 452-462

[7] ROAD NOISE PREDICTION 1 - Calculating sound emissions from road traffic Sétra. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements june 2009.

[8] CALVO, J.A.; SAN ROMÁN, J.L.; ÁLVAREZ C.; QUESADA, A. Influencia de los Parámetros de Conducción en el Ruido Emitido por un Automóvil en el Tráfico Urbano. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Castellón 2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ANALYSIS AND DETECTABILITY IN URBAN ENVIRONMENTS OF AVAS FOR EVs AND HEVs

PACS: 43.50.Lj

Poveda Martínez, Pedro[1]; Ramis Soriano, Jaime[1]; Ivorra, Salvador[1]; Peral Orts, Ramón[2]; Campillo, Nuria[2]; Sánchez, Miguel[2]; Godinho, Luis[3]; Ferreira, Andreia[3]; Mendes, Paulo A. [3]; Barrigón, Juan M.[4]
[1]Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.
[2]Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Miguel Hernandez de Elche.
[3]Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Coimbra.
[4]Departamento de Física Aplicada. Universidad de Extremadura.
Tel. 96 590 34 00
Fax. 96 590 34 64
Email: pedro.poveda@ua.es; jramis@ua.es

## ABSTRACT

Electric and hybrid Electric vehicles (EVs and HEVs) seem to be the future of transport in smart cities and the key for the total reduction of noise disturbance and pollution in urban areas. However, several problems have to be solved in order to guarantee the safety of these types of vehicles. So far, the use of HEVs has shown the danger of a “quiet” transport system in urban environments. This paper analyses in detail the main characteristics of several warning sounds proposed by the industry and introduce a study for their detectability depending on the urban environment.

## RESUMEN

Los vehículos eléctricos e híbridos (EVs y HEVs) están llamados a ser el futuro del transporte en ciudades inteligentes y la clave para la reducción total del ruido y la polución en áreas urbanas. Sin embargo, para garantizar la seguridad vial deben solucionarse diversos problemas asociados a este tipo de vehículos. Hasta el momento, el uso de HEVs ha puesto de manifiesto el incremento del riesgo en entornos urbanos debido a la presencia de un sistema de transporte completamente silencioso. Este trabajo analiza en detalle las principales características de distintos sonidos de advertencia propuestos por la industria e introduce un estudio sobre su detectabilidad en función del entorno urbano donde se encuentre.

## INTRODUCTION

Electric and Hybrid Electric Vehicles (EV and HEV) are proposed as a solution to reduce gas emission in cities, guaranteeing a good air quality in urban areas and to spare the non-renewable energy resources. Since HEV do not have the range limitations of Full EV and also not the drawback of emissions like the pure Internal Combustion Engine (ICE) vehicles, they are closer to the consumer’s expectations and the current driving patterns. In fact, worldwide demand for HEVs will advance rapidly from 1.6 million units in 2010 to 4.3 in 2015, and it is expected nearly 8 million by 2020 [1]. In this context there is an increasing awareness around the issue of the

environmental noise. The World Health Organisation is reporting that traffic noise causes every year the loss of at least one million healthy life-years in Europe and it is responsible for over 20.000 deaths each year via resulting heart problems, reduced sleep quality, etc. The road industry alone cannot entirely solve this problem: road users, public authorities, automotive constructors have their role to play as well. Therefore real and tangible effects in noise reduction could only be achieved by a common effort and a shared responsibility of all these actors.

On the other hand the very low noise levels due to an approaching EV or HEV could be a danger to pedestrians and cyclists, especially for a particular sensitive population as elder and blind people. Thanks to the tyre/road noise, EV may generate a sufficient noise level to warn pedestrians under some driving conditions. Nevertheless, this level can be reduced under other circumstances, particularly when the speed decreases. In this case, they are more likely to mix with pedestrian traffic. Several research laboratories and main automotive manufacturers are developing external noise generators for such vehicles but some outstanding issues remain there. The first issue is how a significant warning level can be generated in front of the vehicle, without generating important environmental noise pollution by radiating high noise levels from the sides and rear of the vehicle. The second issue is concerned with the best feature of the warning noise to use. This should be perceived to come from a vehicle but not as alarming that it will cause a startle reaction and thus increase the danger. Finally, the warning sound (WS) need to change depending on the background noise surrounding the vehicle, however it is not clear how it and under which conditions.

In order to contribute to the study of the warning sound systems, the University of Alicante, the University Miguel Hernandez, the University of Extremadura and the University of Coimbra are developing a research project funded by Directorate General of Traffic (DGT). The main objective is to propose a methodology to analyse and adapt the warning sounds that require to be fitted to electric vehicles taking into account the urban environment.

## MATERIALS AND METHODS

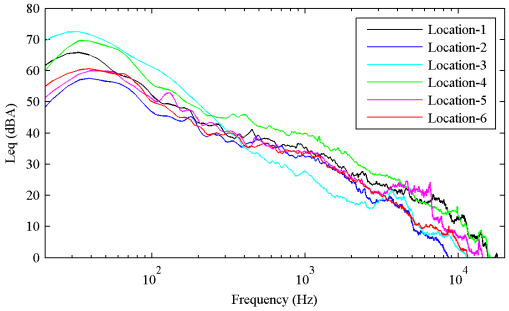
In order to determine the EVs and HEVs detectability, four main phases have been carried out:

### 1. Acoustic Characterisation of Urban Environments.

The categorisation methodology used to define all acoustic urban environments is based on reference [2]. The method consists of classifying the areas according to their street capacity and use in connecting different zones of a town. It is based on the generally accepted assumption that road traffic is the most important source of noise in towns, and may therefore be considered the main cause of the spatial and temporal variability of that noise.
Consequently, it is possible to structure the different environments of a typical city and the corresponding soundscapes in groups with homogenous physical characteristics. For cities with previous studies, a first selection can be made from strategic noise maps provided by the administration according the directive 2002/49/CE.

For each urban environment selected between Alicante and Elche, different sampling points were established, performing short-term measurements. In order to obtain mono and binaural acquisitions, a dummy head was used.

The measurements analysis provides information related to the sound pressure levels and spectral content for each environment. The acquired signals have been used as background noise for the psychoacoustic tests in order to evaluate masking or detectability of different warning sounds.




| ID | Leq, dB(A) |
|---|---|
| Location-1 | 61,2 |
| Location-2 | 59,9 |
| Location-3 | 58,9 |
| Location-4 | 65,7 |
| Location-5 | 61,7 |
| Location-6 | 58,7 |

Figure 1. Leq for selected urban environments.

## 2. Warning Sounds Analysis.

Several types of warning sounds are being proposed by research laboratories and the main automotive manufactures with the aim of increasing the detectability of EV and HEV without becoming new annoying sound sources [3, 4].

In order to establish a set of warning sounds, an exhaustive search was conducted to obtain public audio files. A total of 25 warning sounds were analysed, selecting those whose spectral content showed no relevant variations in time. Each audio file was first normalized in order to allow comparison between them.

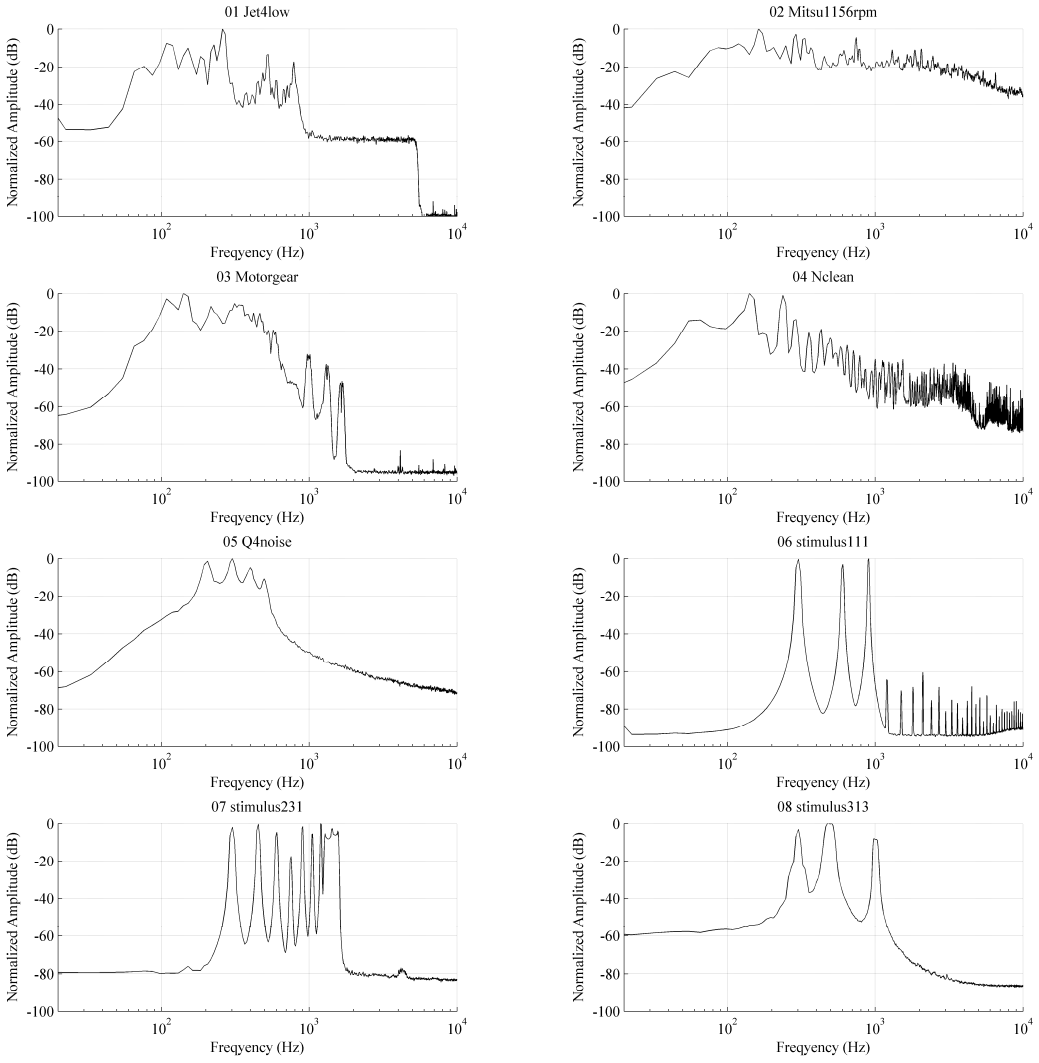



Figure 2. Warning sounds spectrum.

As shown, each sound focuses on a different frequency bandwidth, being all of them below 2 kHz. Warning sounds 1 to 5 correspond to broadband sounds while 6, 7 and 8 [5] represent tonal compositions with and without modulation.

## 3. Determination of the Detectability of EVs/HEVs.

Psychoacoustic tests will be performed to determine the detectability of classified warning sounds in an urban environment. For that, a real situation has been recreated: a pedestrian standing on the sidewalk, at a distance of 3 meters from the centre of the traffic lane, prepared to cross the road. Throughout the essay, different vehicle sounds, with and without AVAS, will be presented to the listener, simulating the movement in both directions. The vehicles will approach the listener individually, at a constant speed of 30 km/h, covering a distance of ±30 meters form the pedestrian. In order to increase the realism of the simulation, the vehicles will be presented together with an urban environment background noise (passage of location 4). The subject must indicate, by pressing a button, the moment he perceives the vehicle approach.

The protocol followed for the test is described below:

A. Pass-by Audio Samples Acquisition

To evaluate the detectability of vehicles, sound samples from a pass-by test were acquired. These samples will be used during the psychoacoustic tests in order to reproduce the sound events more accurately. To do this, a *Head Acoustic HSM III* dummy head was used, with a frequency sample of 44100 Hz and a bit depth of 16 bits with noise shaping algorithm. A fifth order high-pass filter with cut-off frequency of 22 Hz was used during the acquisition. The dummy head was situated at 3 meters from the centre of the traffic lane. The sound acquisition was made from ±30 meters form the dummy head.

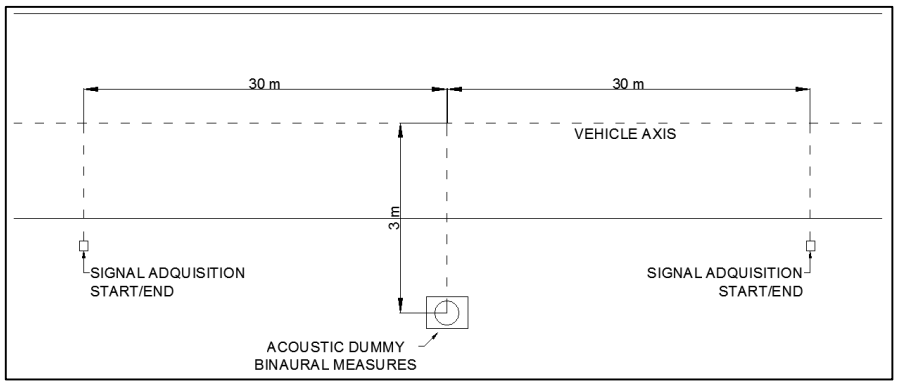



Figure 3. Pass-by test configuration for sound samples acquisition.

The measurements took place at the University Miguel Hernández of Elche, on a traffic lane with an asphalt characterization G20 + S20. The vehicle used was a Hybrid Toyota Pryus.

B. Warning Sounds Pass-by Simulation

The incorporation of warning sounds to the vehicle pass-by sound samples has been carried out by means of signal processing. For that, each selected WS has been treated to simulate a pass-by movement at a constant speed, including the frequency variation introduced by Doppler Effect and the sound pressure level attenuation by distance. In addition, the interaural delay and the frequency effect of human head have been introduced filtering the signal by means of a head-related impulse response (HRIR) [6].

C. Preparation of Sound Samples

All sound samples from the essay have been processed and conditioned for the detectability tests.

Sound Samples Selection:

Every sample from the pass-by test has been analysed and listened carefully in order to discard those useless. Some audio files present different background noises that can somehow affect the validity of the samples. For example, it is possible to distinguish wind, birds, barking, aircraft or any ambulance. These noises can significantly affect the detectability results and therefore they must be filtered or even removed.

Certain soundscapes show a higher level than the allowed by the dynamic range. This phenomenon, mainly originated by the wind gusts, causes signal distortion and therefore a significant deterioration of the recorded message. In order to eliminate part of the signal fluctuations caused by wind, all samples have been filtered by a 5-th order Butterworth high-pass filter with cut-off frequency of 80 Hz.

Sound Pressure Level, dB(A):

To perform the detectability test, a sound sample form the electric vehicle at approximately 30 km/h has been selected. The peak level emitted for this vehicles is 74,4 dB(A). As a test condition, the incorporation of warning sounds to the vehicle will not increase the peak level more than 3 dB(A). Besides, in any case the sounds exceed the HEV level running as a diesel car.

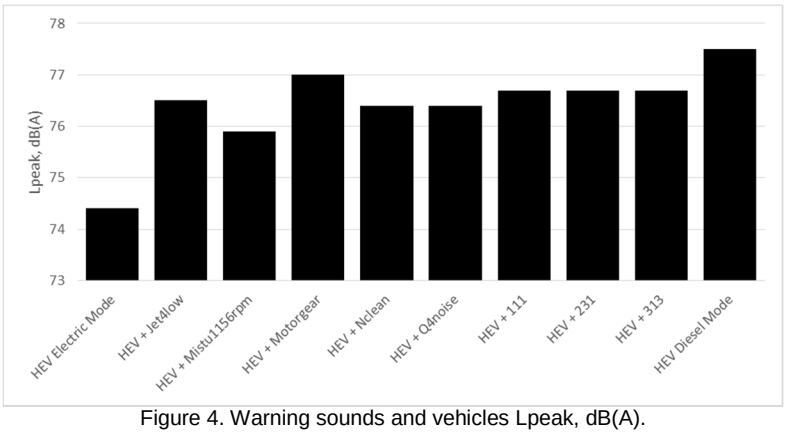


Figure 4. Warning sounds and vehicles Lpeak, dB(A).

Processing for Subjective Test:

Binaural sound samples have been obtained with an acoustic dummy head using diffuse field equalization. This equalization allows to correct the acquired signals, making possible the comparison between the measures provided by conventional microphones. To carry out the psychoacoustic tests, the diffuse field equalization must be removed so that the signals represent accurately the event.

Likewise, the use of headphones during the detectability tests may affect the accuracy of the emitted signal with respect to the real sound. The frequency response of headphones can change the spectral content of the sample, so this effect must be corrected. An inverse filter from the headphones impulse response has been used to solve the aforementioned effects.

Background Noise:

A passage from the sound sample obtained in location 4 has been selected. The equivalent sound pressure level for this background noise is 66.5 dB(A).This location corresponds to a 2 lane road with buildings positioned in one side. The recorded sound includes vehicles stopped on a traffic light next to a roundabout. A bulldozer working at a distance of 60 meters can be perceived.

D. Detectability Test

A software tool has been implemented to perform the detectability test. The application emits, over a constant background noise, different sound samples, individually and randomly. Time between sound events varies between 1 and 20 seconds. Each sound is played four times (two

in the left-right direction and two in right-left direction) making a total of 40 sound events by subject.

The user must indicate the approach of a vehicle by pressing a key. At the end of the test, the application provides a text file with the time response for each sound sample.

## 4. Determination of the Unpleasantness for Warning Sounds.

To carry out the unpleasantness essay we have used the same sound samples of the detectability. These samples have been presented to the listener using the following test panel:

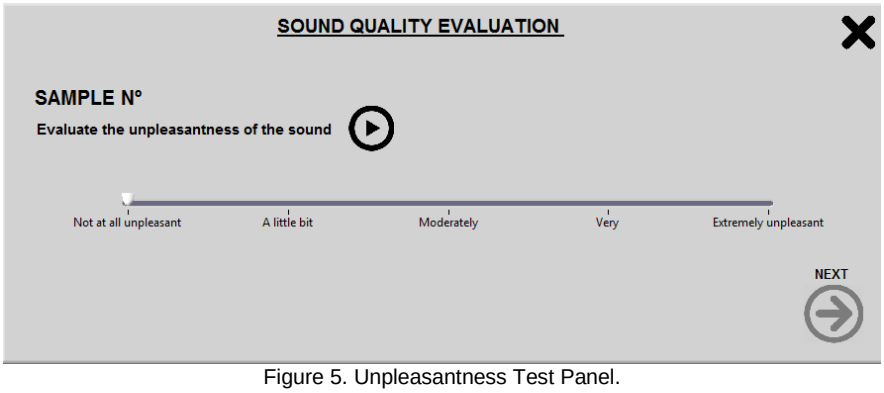



Figure 5. Unpleasantness Test Panel.

The subject must indicate the level of unpleasantness for each sound sample by means of a scroll included into the panel.

Ten different sounds with two repetitions have been presented during the test. The sound of an electric vehicle and a diesel one has been included as an anchor.

## RESULTS

### Detectability Test

Preliminary results show that electric vehicles require a longer response to be detected. These results can be translated as an increased risk for pedestrian since the vehicle detection takes place at a shorter distance from the listener. The difference between the detectability of electric and hybrid vehicles is 7 meters.

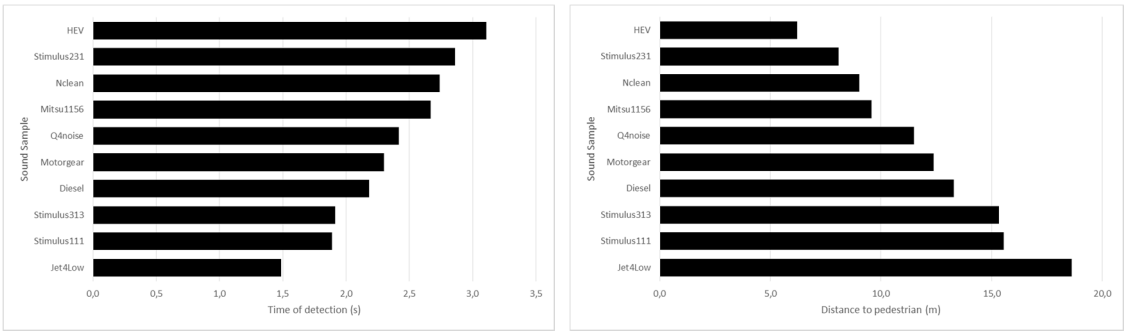



Figure 6. Time of detection (left). Distance to pedestrian (right).

The use of warning sound significantly increases the vehicle detectability, obtaining a better response for the sound samples “Jet4low”, “stimulus111” y “stimulus313”. These three sounds have high-level tonal components at frequencies near 300, 600 and 900 Hz. According to Pearson correlation coefficient, no linear relation is appreciated between the detectability of vehicle and peak level.

**Unpleasantness Test**

A preliminary group of 12 subjects have been polled to establish the unpleasantness of warning sound. To determine the validity of the results, the individual mean quadratic error has been calculated. All participants have a MCE below the 30% of the maximum value allowed into the test with the exception of subject 4, with a value significantly higher. The data for this subject will not be part of the results.

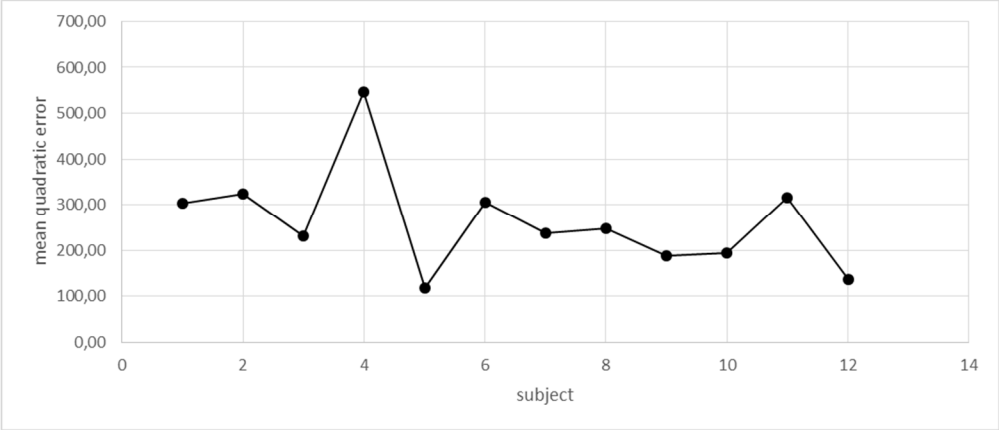



Figure 7. Mean quadratic error.

Next figure shows a preliminary sound distribution obtained by means an analysis of variance, ordered from lowest to highest unpleasantness.

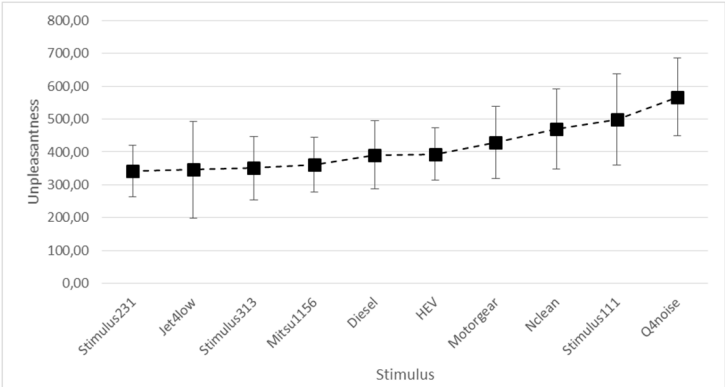



Figure 8. Unpleasantness distribution.

The addition of data from new subjects will allow the establishment of a rigorous Tukey's HSD analysis, confirming the difference between WS unpleasantness with a higher level of confidence.

The noise produced by the diesel car causes less discomfort than the electric one. This result may be due to the social acceptance of this kind of stimuli.

**CONCLUSIONS**

Preliminary results reveal a significant difference between the detectability of EV and ICV. Therefore, there is a real risk for pedestrians in front of the incorporation of this kind of vehicles to the urban traffic.

The use of warning sounds, especially in urban areas with low speed, can improve considerably the vehicle detectability and thereby, decrease the risk of accident. The sounds used in this study does not exceed in any case the level emitted by the diesel car and therefore does not increase the noise pollution in urban environments.

Warning sounds with better detectability, “jet4low”, “situlus111” and “stimulus313” present a similar pattern in their spectral composition. All of them include clearly marked tonal components on frequencies close to 300, 500 and 900 Hz. The results show no relationship between the peak level emitted by the vehicle and his detectability. According to the unpleasantness distribution, the sounds “jet4low” and “stimulus313” cause less annoyance to the listener and thus they will be more suitable as warning sounds in electric vehicles.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out with funding from the General Directorate of Traffic, Spanish Minis-try of Interior, through the project whose reference is SPIP2014-01406 (Study and adequacy of warning sounds in electric vehicles).

## REFERENCIAS

[1] The Freedonia Group, World Hybrid-Electric Vehicle, Oct. 2006.
[2] G. Rey Gozalo, J. M. Barrigón Morillas, V. Gómez Escobar, R. Vílchez-Gómez, et al. Study of the Categorisation Method Using Long-term Measurements. Archives of Acoustics, Vol. 38, No. 3, pp 397-405, 2013.
[3] Parizet, E.; Robart, R.; Chamard, J.Ch.; Schlittenlacher, J.; Pondrom, P.; Ellermeier, W.; Biancardi, F.; Janssens, K.; Speed-Andrews, P.; Cockram, J.. “Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles”. ICA 2013. Montreal.
[4] Etienne Parizet, Wolfgang Ellermeier, Ryan Robart, Auditory warnings for electric vehicles: Detectability in normal-vision and visually-impaired listeners, Applied Acoustics, Volume 86, December 2014, Pages 50-58.
[5] eVADER project. Seventh Framework programme. Theme 7. Transport – SST.2011.RTD-1 GA No. 285095. Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response. Workgroup 2.
[6] V.R. Algazi, R.O. Duda, D.M. Thompson, C. Avendano. “The CIPIC HRTF Database”. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustic. CIPIC. U.C. Davis and Creative Advanced Technology Center.

## AHORRE TIEMPO EN CADA UNO DE LOS PASOS DESDE SU MEDICIÓN ACÚSTICA Y DE VIBRACIONES HASTA COMPLETAR EL INFORME

# PARA MEDIR MEJOR



Realizar medidas acústicas con precisión es un aspecto crítico, pero no todo. Para finalizar un proyecto, usted debe documentar correctamente lo que ha hecho y plasmarlo en un informe.

Le presentamos el nuevo Measurement Partner, un conjunto de soluciones innovadoras para ayudar a nuestros clientes en cada uno de los pasos que requiere el proceso de medida. Haga sus medidas de forma remota a través de la Wi-Fi integrada en su sonómetro de manera que su presencia no afecte al campo sonoro. Realice anotaciones eficientemente con la aplicación para Smartphone. Y automáticamente suba todos los datos a la nube para que, de forma inmediata, pueda usar su programa de post procesado. Para completar la solución, dispondrá de un centro de aprendizaje con multitud de recursos en información y una comunidad online de usuarios con blogs y foros de discusión.

Ver más detalles en **www.bksv.com/measurementpartner**

Brüel & Kjær

BEYOND MEASURE

**Bruel & Kjaer Ibérica S.A.**
Teide 5 · SS. de los Reyes · Madrid · 28301 · Spain
Telephone: +34 91 659 08 20

bruelkjaer@bksv.com

www.bksv.es

BN 1686 – 11

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# SOUND APPROVAL TEST FOR ELECTRIC VEHICLES: RESULTS OF PASS-BY TESTS

PACS: 43.50.Lj

Peral Orts, Ramón[1]; Campillo Davo, Nuria[1]; Campello Vicente, Hector[1]; Poveda Martínez, Pedro[2]; Ramis Soriano, Jaime[2]
[1]Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernandez de Elche. Avenida de la Universidad S/N, 03202, Elche, Spain
[2]Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante.
Tel. 96 665 8579
Email: ramon.peral@umh.es

## ABSTRACT

The Directive 70/157/EEC sets out the guidelines to perform the required sound tests on the sound approval process for motor vehicles. The test known as “pass-by” defines the procedure, based on the ISO 362 standard.

This article presents the results obtained from different pass-by tests carried on a hybrid electric vehicle running in electric mode at different speeds. The purpose of the study is to define the vehicle behaviour and the sound performance compared to a conventional ICE vehicle.

## RESUMEN

La Directiva 70/157 / CEE establece las directrices para realizar las pruebas de sonido necesarias en el proceso de homologación sonora para vehículos a motor. La prueba conocida como "pass-by test" define el procedimiento de ensayo, establecido de la norma ISO 362.

Este artículo presenta los resultados obtenidos de los diferentes ensayos “pass-by” en un vehículo híbrido, funcionando en modo eléctrico a velocidades diferentes. El propósito del estudio es definir el comportamiento del vehículo y el rendimiento de sonido en comparación con un vehículo convencional (gasolina).

## INTRODUCTION

The pressure on the society to dispose of more silent vehicles is higher than ever; the customers demand more silent interior sound for the sake of driving comfort and the society constantly put pressure on the automotive industry to reduce the exterior noise level due to an increasing noise pollution in urban areas.

As a consequence, the automotive industry demands for validated experimental methods and tests to be able to assess a vehicle’s acoustic performance as early as possible in the

development process of new vehicles. One well know test that should be use to study the acoustic behavior of new generation vehicles is the well-known pass-by test [1][2], even though the standards that defined the testing methodology have been partially changed recently [3]. However, up till now, pass-by test has only been used for ICEVs (Internal Combustion Engine Vehicles).

One such problem is the different noise signature of an electric engine compare to an ICE which makes uncertain the results of the classic pass-by test. The main objective of this paper is to analyze the results of the pass-by test in a HEV (Hybrid Electric Vehicle), comparing the results with sound levels emitted by a conventional ICEV.

## NVH problems in electric vehicles

Even though electric and hybrid vehicles, when using the electric motor, are more quite than traditional ICE vehicles, several new NVH problems are coming up suddenly [4]. In terms of noise, three main reasons can be distinguished:

- No masking effect due to the ICE yields noise from various components as the HVAC system (Heating, Ventilation and Air Conditioning), the transmission, oil/water pumps etc.,
- New noise sources, like the electric engine itself. These new noises might be perceived as annoying because of its tonality and high frequency components.
- The rolling noise becomes the major noise source, giving that ICEVs and HEVs emit similar levels of sound at high speed [6][7].

Two other NVH problems that follow with the electrification are:

- The safety for pedestrians and other sensitive groups like children and blind persons. The low exterior noise level from the HEVs at low speeds (at which the tire noise and flow induced noise are low) makes them difficult to identify which make them a moving risk.
- Brand specific and model characteristic sound becomes a challenge to achieve with an electric engine.

## MATERIALS AND METHODS

### Test configuration and instrumentation used

A series of road tests was performed to reach the objective of the study. The methodology used in the tests was founded in the specifications described in the Directive 70/157/EEC, based in the pass-by test described in the ISO 362 standard.

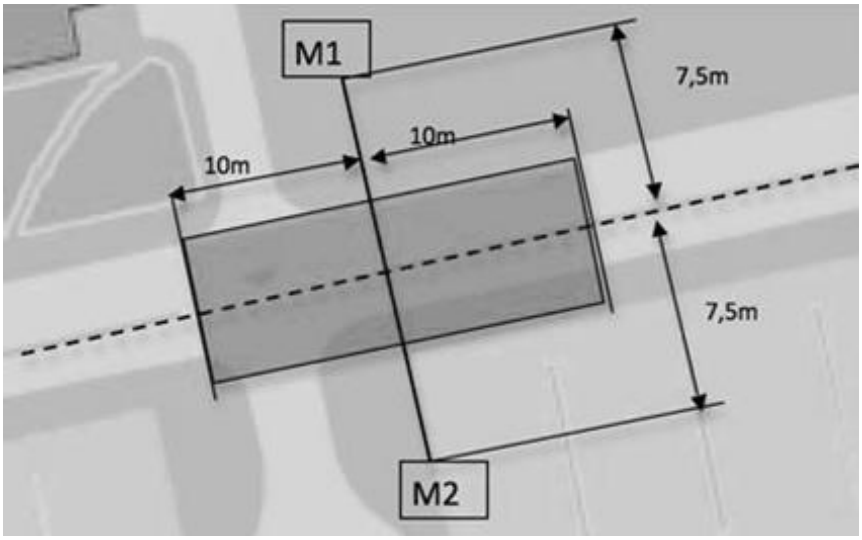



Figure 1. Pass-by test configuration for sound samples acquisition.

The vehicle used for the measurement was a HEV, Toyota Prius. The vehicle's driving conditions throughout the test were the same as for the Pass-By test: the vehicle approaches and circulates by the test area at a constant speed, figure 1. The vehicle was tested for the following reference speeds, running in electric mode: 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h and 50 km/h, and twenty pass-by tests were measured.

The sound pressure levels emitted by the vehicle were recorded by two microphones located at 7.5m from the test track axis, and at 1.2m height. The two microphones utilized were 1/4-inch Bruel & Kjaer model 4935, connected to the 24 bit 16 channel IMC Cronos Compact data acquisition system, operating at a sampling frequency of 25 kHz, and with a Fast time weighting. Photoelectric sensors connected to the data acquisition system recorded the vehicle speed, and the meteorological conditions and road temperature were periodically recorded during the test. During the test, it was registered the background noise.

The tests were conducted on a paved asphalt test area composed of a 20 cm thick subbase of graded aggregate, a 20cm thick base course of graded aggregate, and a surface course consisting of two layers, 5cm G-20 and 4cm S-20 with barren porphyry, and sprayed with prime and tack coats, figure 1. A 20m long section of this road was selected, upon which the test instrumentation was set up. The selected section was clear of obstacles within a 50m radius.



Figure 2. Detail of the asphalt

## NOISE EMISSION OF ELECTRIC AND HYBRID-ELECTRIC VEHICLES

The external noise emitted by ICEVs is composed of two main components: the powertrain noise and the tyre/road (rolling) noise [5].

The powertrain noise depends on the engine revolutions, whereas the rolling noise depends on the speed of the vehicle. Both components are influenced by the driving conditions: constant speed, acceleration, deceleration or braking. The driver behaviour has also an effect on the emitted noise. It is well known that, for ICE vehicles, powertrain noise is prevailing mainly at low speed or under acceleration, whereas rolling noise is the main source at high speed [6]. These components are classically assessed through standard procedures by using the maximum noise level at vehicle pass-by in specified conditions, recorded at 7.5 metres from the track centre and a height of 1.2 metre (ISO 362-1, 2009). This process is performed per frequency band (generally third octave or octave) and over the whole audible frequency range (global levels), taking into account the A-weighting response. To evaluate the change in frequencies, figures 3, 4 and 5 show the spectrum of the same hybrid-electric vehicle (Toyota Prius) tested at different speeds and running in electric mode.

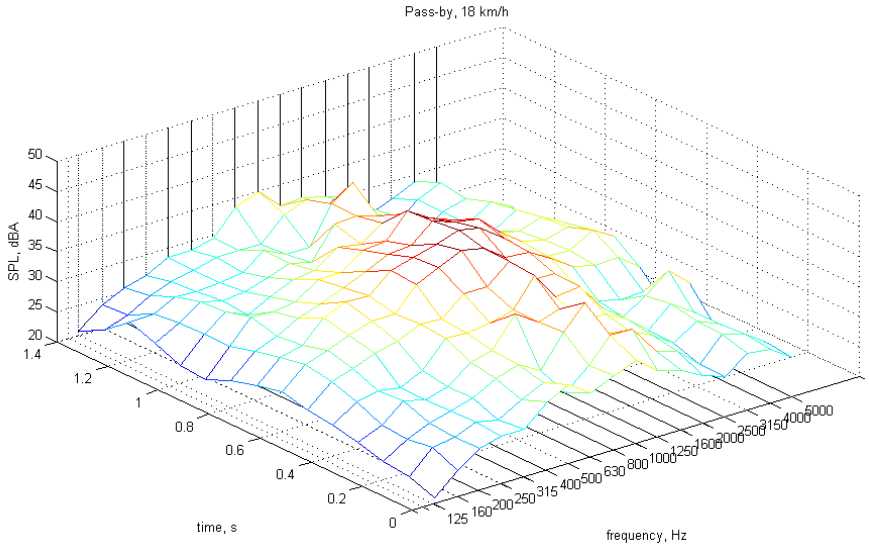



Figure 3. Spectrogram of tested HEV at 18 km/h

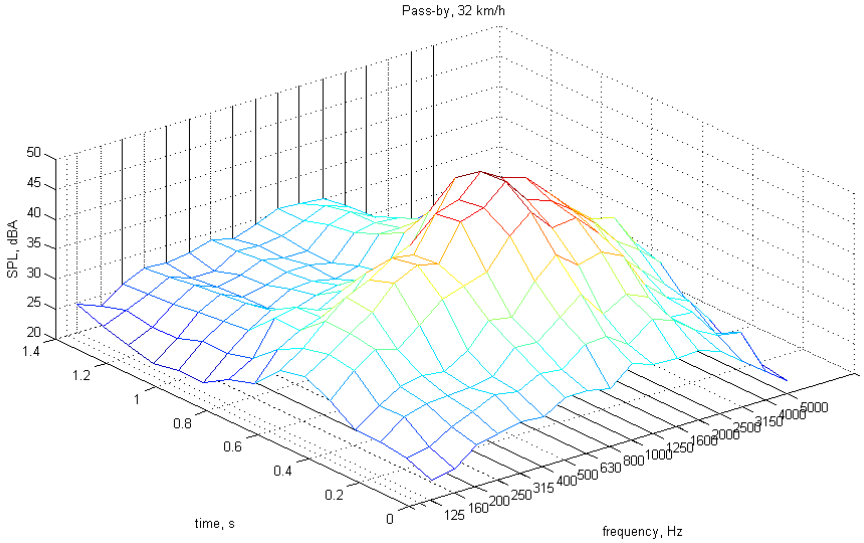



Figure 4. Spectrogram of tested HEV at 32 km/h

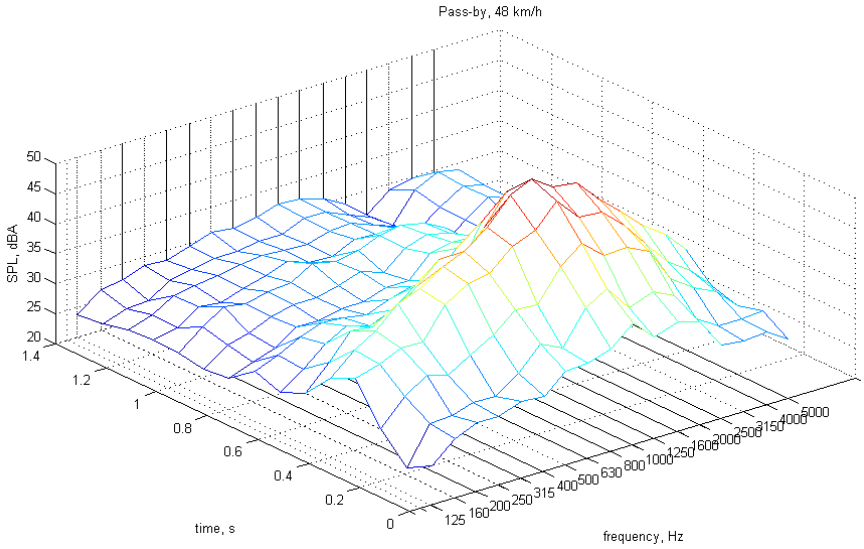



Figure 5. Spectrogram of tested HEV at 48 km/h

Figures 3, 4 and 5 show how change the frequency distribution during the test due to the speed of the vehicle. In all cases, main peak of energy is located between 1 and 2 KHz.

## PASS-BY TEST RESULTS

According to the ISO 362, the maximum sound level is the index measured and the result of the pass-by test. Figure 6 shows those sound levels measured[1], as well as the sound levels measured in previous works (of ICEV tested)[7].

[1] After some corrections due to the background noise

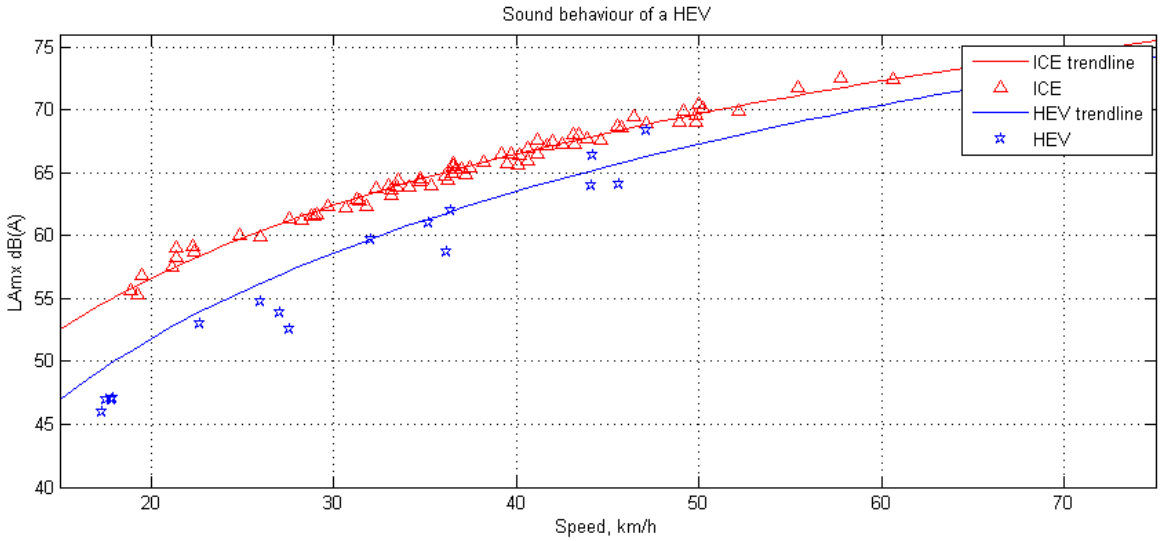



Figure 7. Results of HEV and ICEV and logarithmic trendlines

## CONCLUSIONS

As a conclusion, this paper shows the frequency behaviour of a hybrid electric vehicle tested under the conditions defined by ISO 362 (pass-by test) and running in electric mode. The results confirm that the general spectrum emitted during the test increase the sound level at the frequencies between 1 KHz and 2 KHz, being the frequencies traditionally related with the rolling noise.

As the same time, it was study the sound pressure level of a hybrid electric vehicle depending on the speed during the test and those results were compared with the ICE levels, achieving two main conclusions:

- Back ground noise affects significantly the results of the measured, and, due to the low level emitted by the HEV running at low speed, some measurements were rejected or corrected.

- HEV tested at speeds near 50 km/h emitted level closed to the level emitted by an ICEV.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out with funding from the General Directorate of Traffic, Spanish Minis-try of Interior, through the project whose reference is SPIP2014-01406 (Study and adequacy of warning sounds in electric vehicles).

The authors gratefully acknowledge the logistical support of the COST action TU1105.

## REFERENCES

[1] ISO 362-2:2009. Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles -- Engineering method. Part 2.

[2] ISO 362-1:2015. Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles -- Engineering method -- Part 1.
[3] R. de Abrantes; A. L. S. Forcetto; R. M. Araújo. A eficácia da norma ISO 362:2007 para o controle do ruído de veículos pesados. SIMEA 2015, Brazil.
[4] Linus Falk Lissel. Pass-by noise contribution analysis of electric vehicles. KTH Engineering Sciences. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden 2013
[5] Marie-Agnès Pallasa; Michel Bérengierb; John Kennedyc; Phil Morgand; Sara Gasparonie; Reinhard Wehre. Noise emission levels for electric and hybrid vehicles — First results of the FOREVER project. Transport Research Arena 2014, Paris.
[6] Hamet, J.-F., Besnard, F., Doisy, S., Lelong, J. &Le Duc, E. (2010), New vehicle noise emission for French traffic noise prediction. Applied acoustics, 71, 861-869.
[7] Campello Vicente, Hector. Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos. PhD thesis, Miguel Hernandez University, Spain, 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# METODOLOGÍAS DE MUESTREO PARA EL DISEÑO DE SEÑALES DE ADVERTENCIA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

PACS: 43.50.Lj

Peral Orts, Ramón[2]; Poveda Martínez, Pedro[1]; Ramis Soriano, Jaime[1]; Campello Vicente, Héctor[2]; Ivorra, Salvador[1]; Campillo, Nuria[2]; Sánchez, Miguel[2]; Godinho, Luis[3]; Ferreira, Andreia[3]; Mendes, Paulo A. [3]; Barrigón, Juan M.[4]
[1] Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante.
Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernandez de Elche.
[3] Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Coimbra.
[4] Departamento de Física Aplicada. Universidad de Extremadura.
Tel. 96 590 34 00. Fax. 96 590 34 64
Email: ramon.peral@umh.es; pedro.poveda@ua.es

## ABSTRACT

At low speeds, relatively normal in urban areas, the use of electric or hybrid vehicles produces causes safety problems. This fact leads to the need to design some warning sound. It is therefore necessary to consider two issues. The signal must have a certain level, spectrum and an appropriate timing to be perceived in all urban environments where electric vehicles can be used. Besides, the sound should not disturb the people. To design and evaluate this signal will be necessary to define the different acoustic environments where it will be used. This is the main objective of this paper.

## RESUMEN

A bajas velocidades, relativamente normales en el ámbito urbano, el uso de vehículos eléctricos o híbridos genera problemas de seguridad. Este hecho conduce a la necesidad de diseñar señales de advertencia y para ello es necesario considerar dos aspectos. La señal debe tener el nivel, espectro y temporalidad adecuada para que sea percibida en todos los ambientes urbanos donde se puedan utilizar los vehículos y no resulte molesta para las personas. Para diseñar y evaluar esta señal será necesario, en consecuencia, definir los tipos de entornos acústicos en los que será utilizada. Este es el objetivo de esta comunicación.

## INTRODUCCIÓN

Las previsiones de demanda para vehículos eléctricos e híbridos vaticinan un crecimiento significativo durante la próxima década, estimándose un total de 8 millones en 2020 [1]. Este tipo de vehículos satisfacen las expectativas del consumidor reduciendo las emisiones de gases en las ciudades y garantizando una calidad del aire mayor en entornos urbanos. Sin embargo, el bajo ruido emitido por este tipo de vehículos puede suponer un riesgo para los peatones, especialmente para aquellos con algún tipo de discapacidad visual.

Para situaciones donde la velocidad de circulación supera cierto valor, el ruido generado por el contacto entre neumático y el firme puede ser suficiente para advertir al peatón de la presencia de un vehículo. Sin embargo, existen numerosas zonas del área urbana donde la circulación de vehículos está limitada a una velocidad baja. En este caso, el ruido emitido por un vehículo eléctrico puede ser enmascarado por el ruido de fondo existente, incrementándose así el nivel de riesgo para el peatón. Según un estudio realizado por la National Highway Traffic Safety Administration [2], la posibilidad de producirse un accidente para el peatón es dos veces superior en presencia de vehículos híbridos. Por esta razón es necesario el uso de sonidos de advertencia que alerten al peatón de la presencia de un vehículo en condiciones de baja velocidad.

Los sonidos de advertencia utilizados deberán poseer unas características físicas apropiadas y adecuadas al ambiente sonoro en el que se encuentren inmersos, garantizando que sean detectables en todos ellos y sin producir molestias a la población. Por ello, antes de diseñar estos sonidos es preciso conocer los diferentes entornos urbanos y establecer una clasificación en función de sus características acústicas. Esta clasificación será vital para determinar el grado de idoneidad de los sonidos de advertencia presentados por diferentes grupos y compañías automovilísticas [3][4], en lo referente a su detectabilidad y grado de molestia.

El objetivo del presente trabajo consiste en marcar las pautas previas de una metodología para la clasificación de entornos acústicos urbanos que puedan ser estadísticamente diferenciables, siendo sus características relevantes para el diseño y la evaluación de las señales de advertencia de los vehículos eléctricos o híbridos, así como la evaluación de la influencia de un sonido de advertencia. Es esencial considerar que los propios entornos, si son definidos sólo basándose en características urbanísticas, tendrán una variabilidad temporal en sus características acústicas, lo que podría afectar a la propia definición de entornos estadísticamente diferenciable. Por tanto, dicha variabilidad afectará también a las características de la señal de alerta adecuada para cada entorno y momento. Para definir esta metodología serán empleados parámetros característicos “no acústicos”, pero que definirán de forma clara la esencia sonora de un entorno urbano.

Este trabajo se enmarca dentro de un Proyecto SPIP2014-01406 (Estudio y Adecuación de los Sonidos de Advertencia en Vehículos Eléctricos), financiado por el Ministerio del Interior, Dirección General de Tráfico; y en el que participan conjuntamente la Universidad Miguel Hernández de Elche, la Universidad de Alicante, la Universidad de Extremadura y la Universidad de Coimbra (Portugal).

## Clasificación sonora de ambientes sonoros

El método de caracterización de ambientes acústicos urbanos estará basado en trabajos previos del equipo investigador [5][6]. El método consiste en clasificar las distintas áreas en función de la capacidad y conexión con las diferentes zonas de la ciudad. Tendrá en cuenta que el tráfico es la fuente de ruido de mayor relevancia dentro de un área acotada y que, por tanto, puede ser considerada como la causa principal de la variación espacial y temporal del ruido. Algunos estudios [7] ponen de manifiesto la utilidad de diferentes parámetros para caracterizar temporalmente paisajes sonoros urbanos. Como resultado de investigaciones previas, se han empleado mediciones de corta duración para establecer las características sonoras de los entornos clasificados y poder así, realizar una evaluación previa sobre el enmascaramiento del ruido de advertencia en cada tipo de entorno sonoro.

De esta forma, es posible establecer una agrupación de ambientes sonoros típicos de una ciudad en función de sus características físicas.

En ciudades donde se dispone de mapas de ruido de acuerdo a la directiva 2002/49/CE es posible establecer una primera clasificación en función del nivel de ruido equivalente. Para cada localización es posible realizar un muestreo en diferentes puntos, realizando dos tipos de medida, corta duración (entre 10 y 20 min) y larga duración (1 semana). Los resultados mostrados en el presente trabajo son fruto del análisis y estudio de entornos sonoros a través de medidas de corta duración.

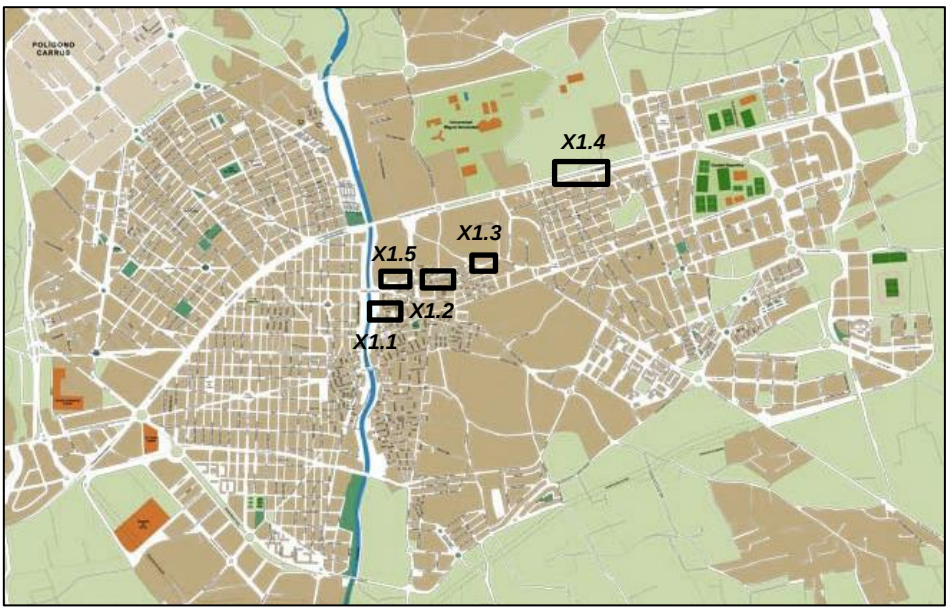



Figure 1. Zonas urbanas clasificadas según la metodología propuesta

A partir del análisis de los registros efectuados se dispondrá de la composición espectral del ruido para cada una de las localizaciones, así como su nivel de presión sonora y niveles máximos y mínimos durante el tiempo total de ensayo.

**Variables para la clasificación de entornos sonoros**

La agrupación de entornos sonoros urbanos propuesta se basa en una distribución cuantitativa de los niveles sonoros obtenidos durante las mediciones (LAeq) y un análisis cualitativo de un conjunto de parámetros “no acústicos” asociados a cada uno de los entornos. En esta fase previa de la investigación, estas variables cualitativas no directamente relacionadas con aspectos sonoros han sido agrupadas en tres bloques:

Asociados al tráfico rodado:
- Volumen medio de vehículos
- Velocidad de circulación
- Número de carriles
- Presencia de transporte público masivo (autobuses)
- Elementos frenado-aceleración, FA (rotondas, badenes, semáforos,…)

Asociados al medio:
- Elementos reflectantes
- Distancia de eje a fachada
- Espacios abiertos ajardinados

Asociados a otras fuentes de ruido

- Terrazas y/o zona de ocio
- Zona de influencia de otras fuentes de ruido tales como aeropuertos o líneas ferroviarias.

**Tipologías de entorno**

La metodología propuesta, y en fase de validación, se basará pues en la agrupación de entornos urbanos empleando las variables descritas en el apartado anterior. Esta clasificación de ambientes sonoros se ha estructurado en 5 estratos, donde los niveles sonoros van asociados a las características del entorno. La distribución propuesta para su análisis se compone de:

***Entornos muy Silenciosos (LAeq<60 dBA):***

- Calles peatonales o semi-peatonales con tránsito medio de personas y sin terrazas
- Calles con 1 sólo carril y tráfico muy bajo a baja velocidad y distancia entre fachadas
- Áreas de semi-peatonales del centro histórico de ciudad
- Sin circulación de transporte público masivo y sin elementos FA

***Entornos Silenciosos (60 dBA<LAeq<64 dBA):***

- Calles peatonales de mucho tránsito de personas y con terrazas y zonas de ocio próximas
- Vías con poco tráfico a baja velocidad y poca distancia entre fachadas y viales
- Velocidad de circulación entre 30 y 50 km/h
- Sin presencia significativa de medios de transporte público masivo y elementos FA

***Entornos ni silenciosos ni ruidosos (64 dBA<LAeq<68 dBA):***

- Vías de 1 o 2 carriles con tráfico medio-alto y dispuestas en espacios abiertos (zonas ajardinadas o parques)
- Vías de 1 carril con tráfico medio y fachadas próximas al vial
- Sin presencia significativa de medios de transporte público masivo

***Entornos ruidosos (68 dBA<LAeq<72 dBA):***

- Vías de 1 o 2 carriles con tráfico alto y dispuestas en espacios semi-abiertos o gran distancia entre fachada y viales
- Vías de 1 carril con tráfico alto y fachadas próximas al vial
- Vías con circulación evidente de transporte público masivo

**Entorno muy ruidoso (LAeq>72 dBA):**

- Vías de 2 o más carriles con tráfico muy alto, dispuestas en entornos con fachadas próximas a los viales con claros elementos de FA y/o elevada velocidad de circulación
- Vías con circulación evidente de transporte público masivo

Tabla 1: Características de los diferentes entornos sonoros

| Variables cualitativas | Entornos sonoros | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Muy Silencioso** | **Silencioso** | **Ni silencioso ni ruidoso** | **Ruidoso** | **Muy ruidoso** |
| Volumen de tráfico | Bajo/nulo | Bajo | Bajo/Medio | Medio/alto | Alto |
| Velocidad de circulación | <30 | 30-50 | 30-50 | 50 | 50 o mas |
| Nº carriles | 0-1 | 1 | 1-2 | 1-2 | 2 o más |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Elementos de frenado | No | No | Si | Si | Si |
| Transporte público | No | No | No | Si | Si |
| Elementos reflectantes | No | No/si | No/si | Si/no | Si |
| Distancia entre eje del vial y fachadas | Elevada (Espacios abiertos) | Baja (sin tráfico)/ Elevada (poco tráfico) | Baja (poco tráfico)/ Elevada (tráfico medio) | Baja (tráfico medio)/ Elevada (tráfico elevado) | Baja |
| Presencia de terrazas (peatonales) | No | Si | Si | - | - |

**Caracterización de los sonidos de advertencia**

En los últimos años, diversos grupos de investigación, compañías automovilísticas o reglamentos estatales, han establecido las características óptimas que deben cumplir los ruidos de advertencia para garantizar su detectabilidad y minimizar su molestia. Las conclusiones alcanzadas son muy dispares, presentando como resultado de su investigación una tipología de sonidos muy amplia.
Tras un análisis previo de diferentes publicaciones relacionadas con las características del ruido de advertencia, dos recomendaciones han sido empleadas para este trabajo:

- Norma Americana del Departamento de Transporte; National Highway Traffic Safety Administration [8]
- Sonidos propuestos como resultado del trabajo realizado en el Proyecto Europeo EVADER[9]

En la tabla 1 se muestran los espectros característicos para sonidos de advertencia extraídos de la bibliografía. Estos valores han sido normalizados y ajustados para un nivel de presión sonora equivalente de 60 dBA (nivel de presión sonora estimado percibido por el peatón).

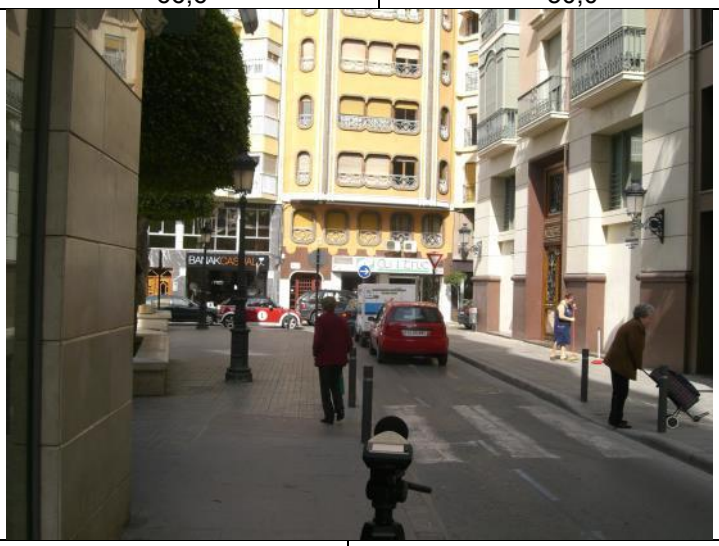
Tabla 2. Espectros de referencia para los sonidos de advertencia, valores en dBA

| Sonidos | *Frecuencias* | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***125 Hz*** | ***160 Hz*** | ***200 Hz*** | ***250 Hz*** | ***315 Hz*** | ***400 Hz*** | ***500 Hz*** | ***630 Hz*** | ***800 Hz*** | ***1 KHz*** | ***1,6 KHz*** | ***1,2 KHz*** | ***2 KHz*** | ***3,15 KHz*** | ***4 KHz*** | ***5 KHz*** |
| **FMVSS** | - | - | - | - | 52.5 | 53.5 | 53.5 | - | - | - | - | - | 52.5 | 49.5 | 47.5 | 44.5 |
| **EVADER1** | -30.4 | -26.9 | -21.9 | 21.1 | 55.3 | -4.7 | 18.7 | 52.9 | 49.5 | 55.6 | -6.3 | -12.4 | -4.3 | -11.2 | -15.3 | -12.7 |
| **EVADER2** | -27.6 | -24.8 | -25.2 | 12.5 | 46.7 | 41.5 | 47.6 | 44.3 | 41.4 | 48.9 | 55.7 | 56.2 | 1.3 | -15.3 | -14.7 | -12.4 |
| **EVADER3** | 1.4 | 3.7 | 8.1 | 30.5 | 48.5 | 41.6 | 59.2 | 29.5 | 15.3 | 51.2 | 17.5 | -2.5 | -8.7 | -12.2 | -14.2 | -15.4 |

Estos espectros serán empleados para el estudio previo de la detección de un sonido de advertencia en cada uno de los ambientes sonoros propuestos en la presente investigación.

**Muestras reales de los ambientes clasificados**

A continuación se muestran los cinco ambientes sonoros caracterizados y medidos, que servirán de referencia para establecer el grado de detección (o enmascaramiento) de los sonidos de advertencia estudiados.

<table>
<tr><td colspan="2">Entorno muy silencioso</td><td colspan="2" rowspan="3">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">Descripción:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Zona semi-peatonal en la ladera del rio Vinalopó, con una circulación muy reducida de vehículos para acceder a un área residencial. Sin elementos reflectantes significativos.<br><br>Medición:<br>Tiempo total de medida 10 min<br>Adquisición y espectro cada 5 s</td></tr>
<tr><td>$L_{Aeq}$</td><td>$L_{Amax}$</td><td>$L_{Amin}$</td></tr>
<tr><td>54,4</td><td>66,6</td><td>50,0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Entorno silencioso</td><td colspan="2" rowspan="3">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">Descripción:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Calle del centro histórico con circulación baja de vehículos (70 vehículos a la hora), sin circulación de transporte públivo masivo no elementos de FA. Distancia entre eje y fachada a ambos lasos de la misma de 5,5 metros. Velocidad de circulación de 30 Km/h.<br><br>Medición:<br>Tiempo total de medida 10 min<br>Adquisición y espectro cada 5 s</td></tr>
<tr><td>$L_{Aeq}$</td><td>$L_{Amax}$</td><td>$L_{Amin}$</td></tr>
<tr><td>60,4</td><td>80,2</td><td>48,1</td></tr>
</table>

| Entorno ni silencioso ni ruidoso |  | |
|---|---|---|
| Descripción: | | |
| Avenida de 2 carriles con circulación de transporte público y sin elementos de FA. Sin edificios próximos a la vía y circulación media de vehículos (300 vehículos por hora) | | |
| Medición:<br>Tiempo total de medida 10 min<br>Adquisición y espectro cada 5 s | | |
| $L_{Aeq}$ | $L_{Amax}$ | $L_{Amin}$ |
| 66,7 | 78,6 | 41.1 |

| Entorno ruidoso |  | |
|---|---|---|
| Descripción: | | |
| Avenida de 2 carriles con circulación de transporte público y con elementos de FA (2 semáforos). Sin edificios próximos a uno de los lados dela vía y circulación elevada de vehículos (700 vehículos por hora) | | |
| Medición:<br>Tiempo total de medida 20 min<br>Adquisición y espectro cada 5 s | | |
| $L_{Aeq}$ | $L_{Amax}$ | $L_{Amin}$ |
| 70,6 | 97,3 | 50,8 |

<table>
<tr><td colspan="3">Entorno muy ruidoso</td></tr>
<tr><td colspan="3">Descripción:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Avenida de 2 carriles + carril Bus, con fachadas a ambos lados de la calzada y circulación permitida hasta 50 km/h.<br>Volumen de tráfico muy alto ()</td><td rowspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">Medición:<br>Tiempo total de medida 10 min<br>Adquisición y espectro cada 5 s</td></tr>
<tr><td>$L_{Aeq}$</td><td>$L_{Amax}$</td><td>$L_{Amin}$</td></tr>
<tr><td>73,6</td><td>92,2</td><td>60,1</td></tr>
</table>

En cada uno de ellos se han llevado a cabo medidas de corta duración (10-15 min) en las cuales se han realizados registros instantáneos de 5 segundos. Como resultado se dispone de los espectros de frecuencia medidos.

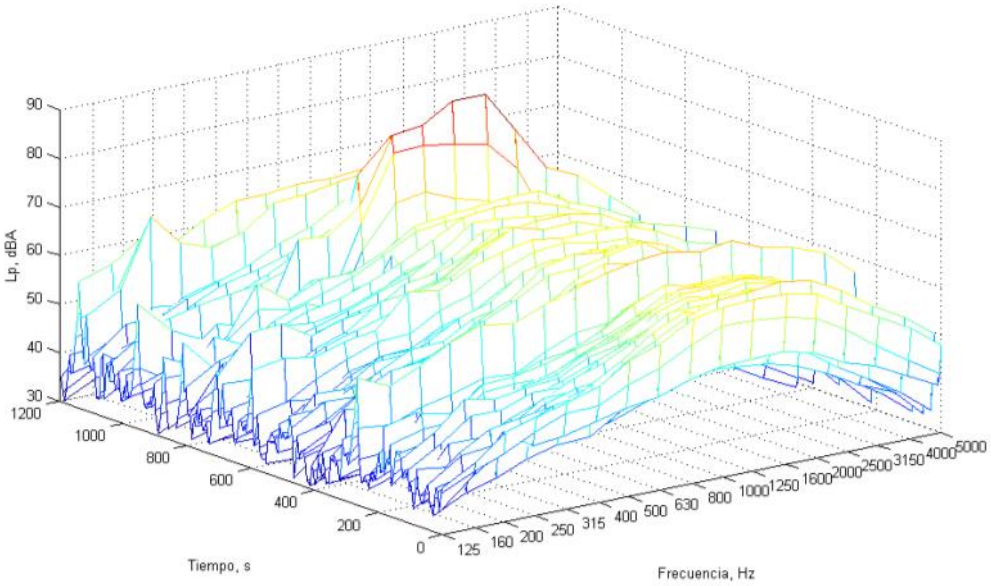



Figura 3. Diagrama espectral de la medida tomada en el entorno ruidoso

**RESULTADOS**

Con el propósito de analizar el grado de detección de los diferentes sonidos de advertencia, las siguientes figuras muestran:

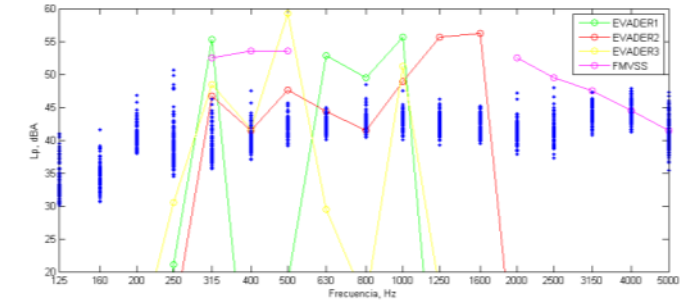



Figura 4. Entorno muy silencioso

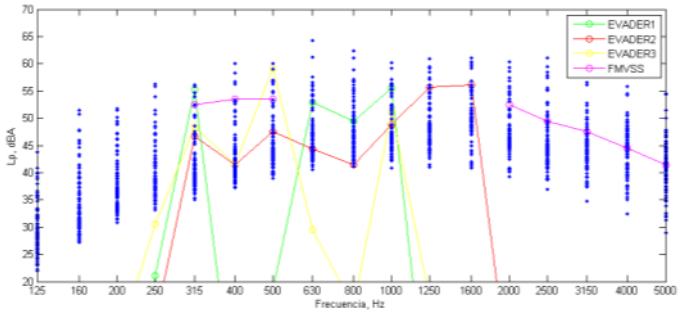



Figura 5. Entorno silencioso

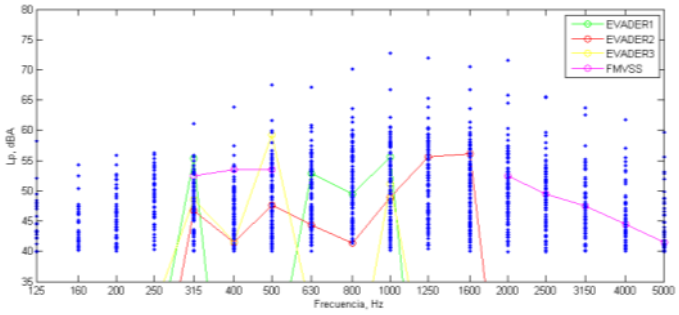



Figura 6. Entorno ni silenciosos ni ruidoso

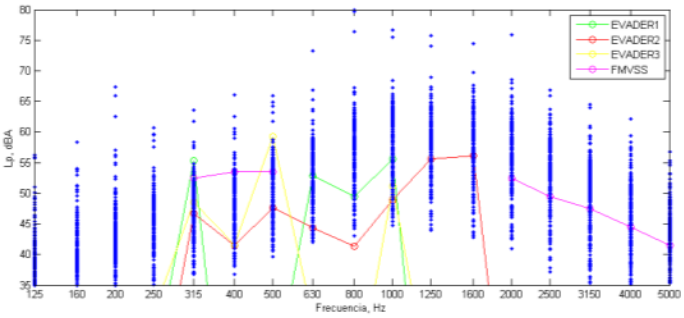



Figura 7. Entorno ruidoso

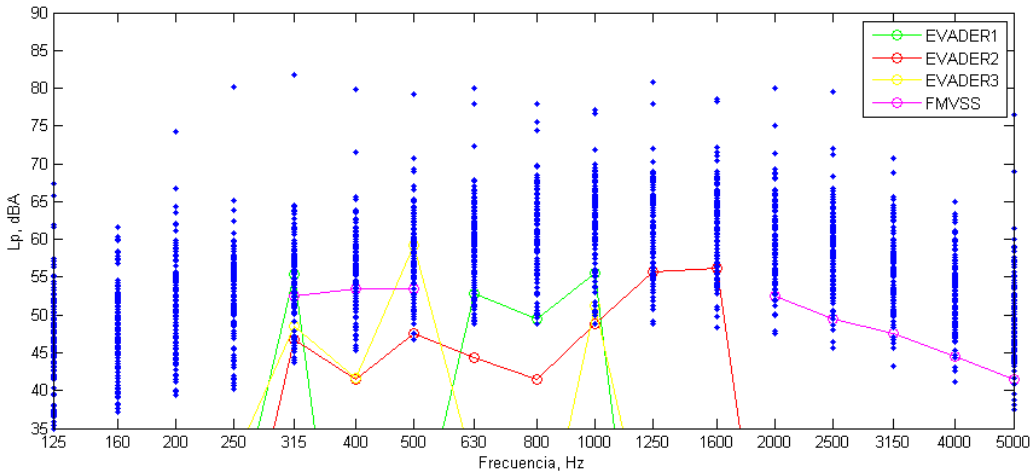



Figura 8. Entorno muy ruidoso

En todos los casos estudiados en este análisis previo, se ha calculado ***un índice objetivo de detección***, basado en el porcentaje de espectros que cumple que la suma de las diferencias de niveles positivos entre el espectro del sonido de advertencia y cada uno de los espectros sonoros instantáneos en el entorno sonoro es mayor de 3 dB.

Índice de detección: $\mathrm{IDt} = \frac{\mathrm{Nº}\ \Delta L_{p,3dB}}{\mathrm{Nº\ muestras}}$

Donde $\text{Nº}\,\Delta L_{p,3dB}$ se obtiene del cálculo del número de muestras que cumplen la siguiente desigualdad $\sum\|\Delta L_{p,WS} - \Delta L_{p,E}\| > 3dB$[1]

Siendo

- $\Delta L_{p,WS}$ Los niveles de presión del sonido de advertencia por bandas de octava
- $\Delta L_{p,E}$ los niveles medidos en el entorno evaluado.

Tabla 3. Índice de detección de los sonidos de advertencia en los 5 entornos sonoros analizados

| Índice de detección (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***Tipología de entorno*** | **Sonidos de advertencia** | | | |
| | **FMVSS** | **EVADER 1** | **EVADER 2** | **EVADER 3** |
| ***Entorno muy silencioso*** | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ***Entorno silencioso*** | 95 | 95,9 | 88,7 | 95 |
| ***Entorno ni silencioso ni ruidoso*** | 85 | 90,83 | 71,7 | 88,3 |
| ***Entorno ruidoso*** | 81,7 | 93,4 | 27,8 | 91,3 |
| ***Entorno muy ruidoso*** | 22,5 | 31,7 | 11,7 | 30 |

## CONCLUSIONES

Con todo lo analizado anteriormente se puede determinar que el grado de detección de un sonido de advertencia se verá influenciado de forma muy significativa por el tipo de entorno por el que circule el vehículo que lo lleva insertado. Esta conclusión sirve como punto de partida para una nueva línea orientada hacia el estudio de la detectabilidad de sonidos de advertencia en diferentes entornos urbanos a través de ensayos psicoacústicos. Los ambientes sonoros registrados serán utilizados como ruido de fondo sobre los que se insertarán muestras de audio pertenecientes a vehículos eléctricos, híbridos y de combustión interna.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo con la financiación de la Dirección General de Tráfico, a través del proyecto SPIP2014-01406 (Estudio y adecuación de advertencia suena en los vehículos eléctricos).

## REFERENCIAS

[1] The Freedonia Group, World Hybrid-Electric Vehicle, Oct. 2006.
[2] NHTSA, Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. Technical Report, September 2009.
[3] PARIZET, Etienne, et al. Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles. En Proceedings of Meetings on Acoustics. Acoustical Society of America, 2013. p. 040033.
[4] MISDARIIS, Nicolas; GRUSON, Anais; SUSINI, Patrick. Detectability study of warning signals in urban background noises: a first step for designing the sound of electric vehicles. En Proceedings of Meetings on Acoustics. Acoustical Society of America, 2013. p. 040032.

[1] Se incluirán en el sumatorio únicamente las diferencias positivas de niveles (simbolizado con ||)

[5] G. Rey Gozalo, J. M. Barrigón Morillas, V. Gómez Escobar, R. Vílchez-Gómez, et al. Study of the Categorisation Method Using Long-term Measurements. Archives of Acoustics, Vol. 38, No. 3, pp 397-405, 2013.
[6] Barrigón Morillas, J.M., Gómez Escobar, V., Méndez Sierra, J.A., Vílchez Gómez, R., and Trujillo Carmona, J. (2002b). An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain. Appl. Acoust. 63, 1061-1070.
[7] Antonio J. Torija, Diego P. Ruiz, A. Ramos-Ridao. Required stabilization time, short-term variability and impulsiveness of the sound pressure level to characterize the temporal composition of urban soundscapes. Applied Acoustics 72 (2011) 89–99.
[8] Department of Transportation; National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles, 49 CFR Parts 571 and 585, 2013.
[9] DUBOIS, Françoise; BAUDET, Guillaume; CHAMARD, Jean-Christophe. EVADER: Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response. Acoustics 2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ENSAIO DE RUÍDO E VIBRAÇÕES, NO INTERIOR DO HABITÁCULO DE UM VEÍCULO LIGEIRO DE PASSAGEIROS

PACS: 43.50.Lj

Mário Mateus; João A. Dias Carrilho; Manuel C. Gameiro da Silva
ADAI, LAETA – Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Pólo II)
3030-201 Coimbra, Portugal
Tel./fax:(351)239 708 580/89.
E-mail: mario.mateus@adai.pt, joao.carrilho@dem.uc.pt, manuel.gameiro@dem.uc.pt

## ABSTRACT

In the proposed work we present the results of road tests where sound level and vibration level measurements were performed inside the cabin of a passenger motor vehicle, obtained in three separate campaigns at mileage: 0 km; 35,000 km; and 72,000 km.
Different types of road were considered, as well as various circulation speeds and engine operating regimes.

At the end of the three campaigns it was found that noise levels are within an uncertainty band of ± 2 dB range with a 95% confidence level.

The vibration values approximately doubled at the third campaign. This result may be associated with degradation of the suspension and vehicle damping system.

## RESUMO

No trabalho proposto apresentam-se os resultados das medições de nível sonoro e de vibração efetuadas no interior do habitáculo de uma viatura ligeira de passageiros, obtidos em três campanhas distintas de quilometragem: 0 km; 35.000 km; e 72.000 km.

Consideraram-se várias tipologias de ensaio que conjugaram distintos tipos de vias, de revestimento de pisos, de velocidade de circulação e de regimes de funcionamento do motor.

No final das três campanhas verificou-se que os níveis sonoros encontram-se dentro de um intervalo de incerteza de ±2 dB, com um nível de confiança de 95%.

Na terceira campanha, os valores de vibração aumentaram, aproximadamente, para o dobro. Este resultado poderá estar associado à degradação do sistema de suspensão e amortecimento do veículo.

## INTRODUÇÃO

No trabalho proposto apresentam-se os resultados das medições de nível sonoro e de vibração efetuadas no interior do habitáculo de uma viatura ligeira de passageiros, obtidos em três campanhas distintas de quilometragem: 0 km; 35.000 km; e 72.000 km.

Consideraram-se várias tipologias de ensaio que conjugaram distintos tipos de vias, de revestimento de pisos, de velocidade de circulação e de regimes de funcionamento do motor.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pressão acústica no interior do habitáculo foi adquirida utilizando um simulador cabeça/torso da Brüel & Kjær modelo 4100, instalado no lugar do passageiro da frente. Este simulador contém microfones de medição localizados na zona correspondente à entrada do canal auditivo. O sinal de cada um dos microfones foi condicionado por um amplificador NEXUS 2690-A-OF2, também da Brüel & Kjær, e convertido para formato digital de 24 bits a 48 kHz, utilizando uma interface UA-55 da Roland. O sinal digital foi gravado no disco de um computador portátil utilizando o *software* de gravação e edição áudio AUDACITY.

Para o registo do sinal correspondente à vibração foi utilizado um medidor da marca Svantek, modelo SVAN 958 e um acelerómetro triaxial modelo SV39A. Este acelerómetro foi instalado no banco traseiro, no qual se encontrava sentado o operador do sistema áudio.

Optou-se por realizar a aquisição dos dados em modo de gravação contínua, durante todo o ensaio, tendo sido assinalado o início de cada teste com uma pequena descrição verbal seguido de um sinal de “marca”. Cada teste teve uma duração nominal de 30 segundos.

Inicialmente, com o veículo ainda parado, foi dado início simultâneo à gravação áudio e de vibração, para maior facilidade de sincronização durante a fase de processamento dos dados. Procedeu-se à medição do ruído do motor a diferentes rotações por minuto, atuando o pedal do acelerador até se obter um regime de rotações fixo e estável durante a duração de cada teste.

De seguida, com o veículo em andamento e seguindo a mesma metodologia de sinalização do início de cada teste, foram realizados vários testes em condições estáveis de velocidade, rotação do motor e qualidade do piso.

O percurso e locais de medição foram os mesmos utilizados durante as três campanhas.

## PROCESSAMENTO DOS DADOS

Uma vez terminado o ensaio, procedeu-se à segmentação da gravação áudio em ficheiros WAV individuais correspondentes a cada teste. Estes foram então carregados num *software* de análise, desenvolvido em LabVIEW, que calcula a densidade espectral de potência, em frequência, e grava o resultado num ficheiro CSV. A média agrupada da densidade espectral de potência foi calculada em blocos de 48000 amostras, o que se traduz numa resolução de 1 Hz. Os ficheiros CSV foram importados para o EXCEL, onde foi calculado o espetro de terço de oitava por agregação em bandas e por fim, o nível sonoro com ponderação A.

Os valores da aceleração eficaz, obtidos em cada um dos eixos, foram ponderados em frequência pelas curvas wd (eixos x e y) e wk (eixo z). Os dados resultantes da aquisição do sinal de aceleração foram processados pelo *software* SVAN PC++ (ver. 2.0.3). Com estes valores foi calculado o valor da vibração total, sendo este o que resulta da combinação daquelas três componentes multiplicadas pelos fatores kx = ky =1,4 e kz=1, cujos valores correspondem aos que se encontram definidos para a condição de conforto pela norma ISO 2631-1:1997 [1].

**MATRIZ DE TESTES**

| Ponto de teste | Descrição |
|---|---|
| TP1 | Ruído do motor a 750rpm (veículo parado) |
| TP2 | Ruído do motor a 1500rpm (veículo parado) |
| TP3 | Ruído do motor a 2500rpm (veículo parado) |
| TP4 | Ruído do motor a 3000rpm (veículo parado) |
| TP5 | Ruído do motor a 3500rpm (veículo parado) |
| TP6 | Ruído do motor a 2250rpm (veículo parado) |
| TP7 | Ruído do motor a 3800rpm (veículo parado) |
| TP8 | Empedrado a cerca de 35km/h – 1 |
| TP9 | Empedrado a cerca de 35km/h – 2 |
| TP10 | Estrada nacional 50km/h em 4ª velocidade |
| TP11 | Estrada nacional 60km/h em 4ª velocidade |
| TP12 | Estrada nacional 80km/h em 5ª velocidade |
| TP13 | Estrada nacional 50km/h em 5ª velocidade |
| TP14 | Estrada nacional 60km/h em 5ª velocidade |
| TP15 | Estrada nacional 80km/h em 6ª velocidade |
| TP16 | Estrada nacional 90km/h em 5ª velocidade |
| TP17 | Estrada nacional 90km/h em 6ª velocidade |
| TP18 | Estrada nacional 70km/h em 6ª velocidade |
| TP19 | Estrada nacional 70km/h em 5ª velocidade |
| TP20 | Estrada secundária 60km/h em 6ª velocidade |
| TP21 | Auto-estrada 90km/h em 6ªa velocidade |
| TP22 | Auto-estrada 120km/h em 6ªa velocidade |
| TP23 | Auto-estrada 140km/h em 6ªa velocidade |

**RESUMO DOS RESULTADOS DE RUÍDO**

*Ruído do motor*: A linha azul mostra o nível sonoro, em função da rotação do motor, obtido durante a primeira campanha. A linha vermelha mostra o nível sonoro obtido durante a segunda campanha. Em toda a gama de rotações, nestas duas primeiras campanhas a diferença entre as duas curvas é sempre menor que 2 dB. Relativamente à terceira campanha verifica-se uma tendência geral para o aumento do nível sonoro, excetuando, nos regimes de rotação mais elevada, a 2250 r.p.m. e 3500 r.p.m.

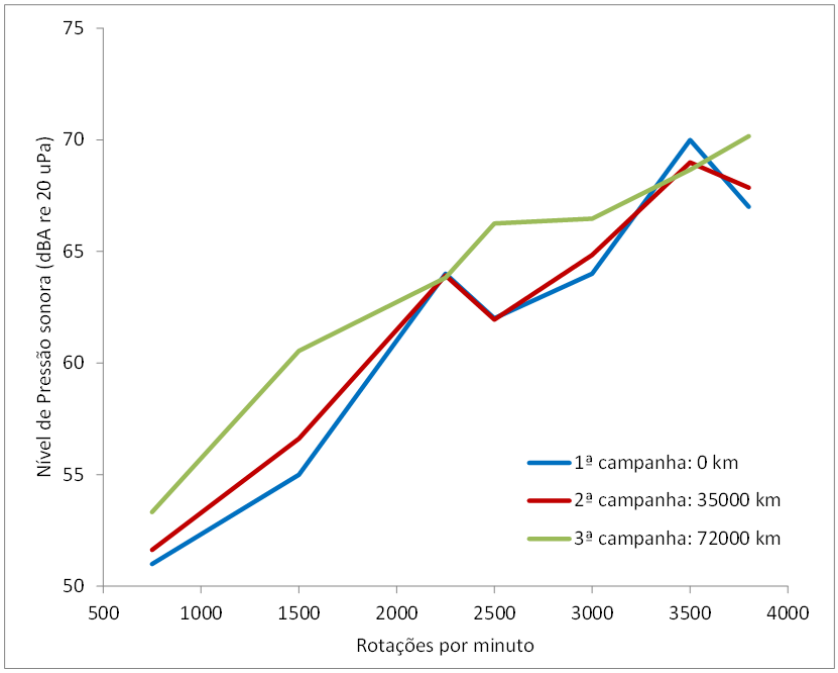



Figura 1 – Nível sonoro do motor medido no interior do veículo estacionário, em função da velocidade de rotação do motor, para cada uma das três campanhas.

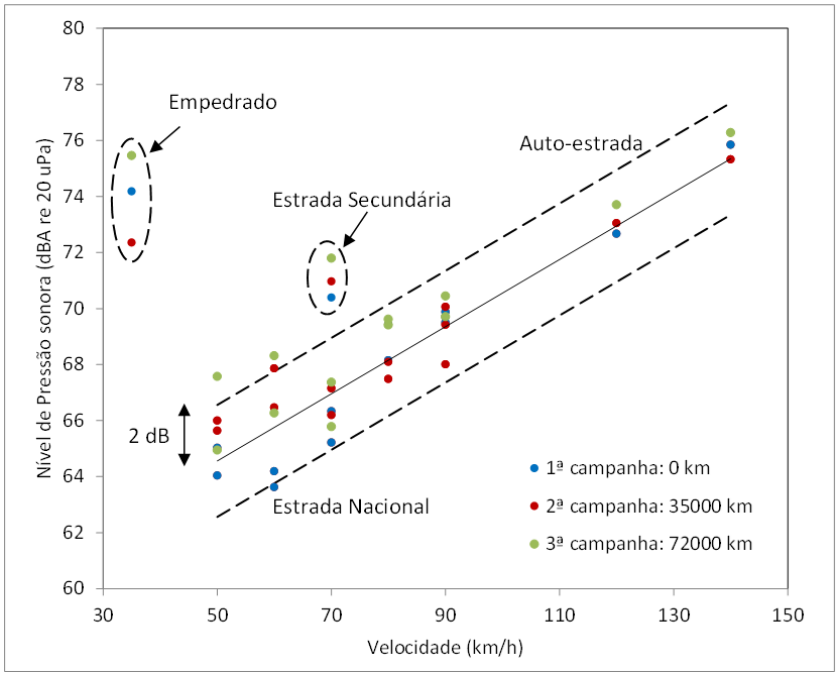



Figura 2 – Níveis sonoros obtidos nos testes em estrada para várias tipos de estrada, velocidade e regime do motor, para cada uma das três campanhas.

*Ruído em andamento:* Os pontos a azul correspondem às medições efetuadas durante a primeira campanha; os pontos a vermelho correspondem à segunda campanha. Na terceira campanha os pontos foram sobrepostos no gráfico com a cor verde. A linha solida representa um ajuste linear aos resultados de ambas as campanhas, em estrada nacional e autoestrada, e as linhas o tracejado mostram o correspondente intervalo de incerteza expandida de ±2 dB com nível de confiança de 95%. Estão também assinalados os resultados de medições pontuais efetuadas numa estrada de empedrado e numa estrada secundária.

## RESUMO DOS RESULTADOS DE VIBRAÇÃO E COMPARAÇÃO COM AS CAMPANHAS ANTERIORES

*Vibração em andamento:* Os pontos a azul correspondem às medições efetuadas durante a primeira campanha; os pontos a vermelho correspondem à segunda campanha e os verdes à terceira campanha. Estão também assinalados os resultados de medições pontuais efetuadas numa estrada de empedrado.

Para todas as condições de ensaio incluídas na matriz de testes, excetuando as referências TP1 a TP7 que não foram incluídas, os valores médios de vibração obtidos nas duas campanhas foram iguais a 0,47 $m.s^{-2}$. Os valores do desvio padrão correspondentes às leituras efetuadas durante a primeira e a segunda campanha foram, respetivamente, de 0,08 $m.s^{-2}$ e de 0,09 $m.s^{-2}$.

Todos os níveis de vibração relativos aos ensaios efetuados, em estrada de asfalto, encontram-se contidos numa faixa entre 0,33 $m.s^{-2}$ e 0,67 $m.s^{-2}$.

Considerando agora os resultados obtidos na terceira campanha, e considerando exclusivamente os ensaios efetuados em estrada de asfalto, o valor médio de vibração obtido foi igual a 0,83 $m.s^{-2}$, com um desvio padrão de 0,14 $m.s^{-2}$. Os níveis de vibração relativos aos ensaios efetuados, em estrada de asfalto, encontram-se contidos numa faixa entre 0,63 m.s-2 e 1,08 $m.s^{-2}$.

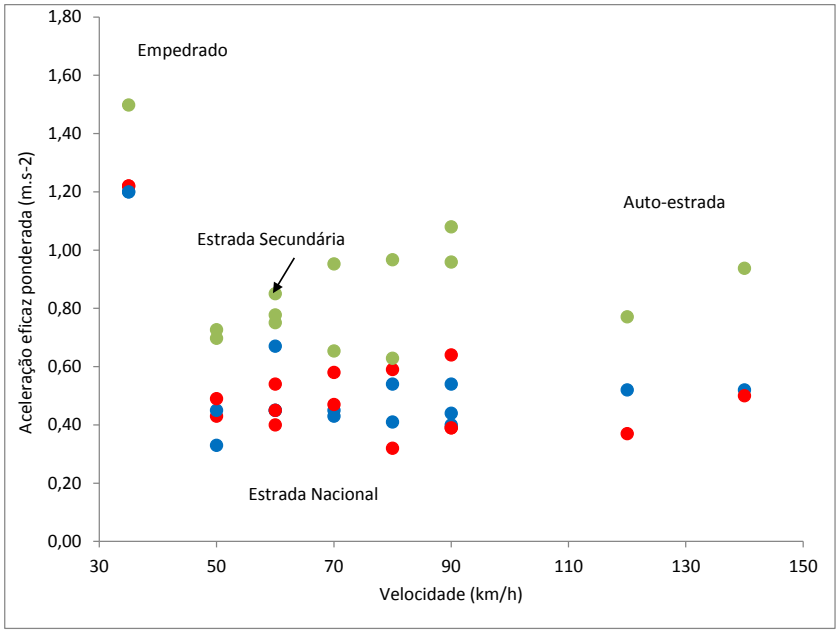



Figura 3 – Níveis de vibração obtidos nos testes em estrada para várias tipos de estrada, velocidade e regime do motor, para cada uma das três campanhas.

## CONCLUSÃO

No que respeita ao ruído, na generalidade os resultados obtidos durante as três campanhas de medição encontram-se dentro de um intervalo de incerteza de ±2 dB, com um nível de confiança de 95%. Dado que a maioria das pessoas dificilmente consegue distinguir diferenças no nível sonoro inferiores a 3 dB, concluímos que não existe diferença significativa entre os níveis sonoros registados durante as várias campanhas. Contudo, durante a terceira campanha verificou-se uma tendência para o aumento dos níveis sonoros registados.

Relativamente às vibrações, e tendo em conta os resultados obtidos nas duas primeiras campanhas, na terceira campanha foi evidenciado que os valores médios de vibração aumentaram significativamente. Verificou-se um aumento dos valores médios para, aproximadamente, o dobro, ou seja de 0,47 $m.s^{-2}$ para 0,83 $m.s^{-2}$). Este fato poderá estar associado à degradação do sistema de suspensão e amortecimento do veículo.

# CREACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SENSOR ACÚSTICO CONECTADO DE BAJO COSTE PARA EL ANÁLISIS DEL CAMPO SONORO

PACS 43.50.Yw

Noriega Linares, Juan Emilio[1]; Navarro Ruiz, Juan Miguel[1]
1 Dpt Telecomunicación, Univ. Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Avda. de los Jerónimos, s/n, 30.107 Guadalupe (Murcia), España
jenoriega@ucam.edu, jmnavarro@ucam.edu

## RESUMEN

En este estudio se describe la creación de un prototipo de sensor acústico realizado con elementos de bajo coste para su utilización en el análisis del campo sonoro. Se presenta el diseño del sensor, sus componentes, la metodología a seguir preparando los algoritmos y la conexión a la nube para compartir los resultados en tiempo real. Finalmente se aportan conclusiones sobre la experiencia en el diseño y las futuras mejores e implementaciones del sensor.

## ABSTRACT

In this paper, the prototyping of a low-cost acoustic sensor for its use in the analysis of the sound field is described. The sensor design and a report of the components are presented too. It is shown also the methodology followed to prepare the algorithms and the connection to the cloud, to share the results in real time. Finally, conclusions about the experience in the design and future works and implementations are provided.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha surgido un nuevo concepto de mini ordenador, también referido como *system-on-a-chip*, *SoC* [1], con el rasgo distintivo de tener un bajo coste siendo accesible económicamente a casi todo el mundo. La Raspberry Pi [2] es uno de los *SoC* más extendido. Gracias a su precio asequible y rápida distribución, que han facilitado su expansión, han llegado a un conjunto de nuevos desarrolladores, desde profesionales a usuarios amateurs, que han comenzado a crear numerosas aplicaciones capaces de interactuar con el mundo real. Este dispositivo Raspberry Pi [2], de tamaño reducido y consumo muy bajo, lo hacen ser el candidato perfecto para su uso en cantidad de proyectos, desde centros multimedia o estaciones meteorológicas [3] [4], hasta proyectos más complejos por parte de investigadores profesionales como, por ejemplo, el uso de conjuntos de Raspberry para su uso en computación en paralelo en la nube [5].

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y desarrollo de la creación de un sensor acústico basado en la plataforma Raspberry Pi para la monitorización del ambiente sonoro. En otros trabajos de los mismos autores [6] [7] se han usado plataformas de bajo coste para la medición de ruido. En este caso el cálculo de los parámetros se pretende realizar *on-board* junto con la transmisión en tiempo real a un servicio de almacenamiento y visualización de datos en la nube.

El concepto, recientemente en auge, de ciudad inteligente ha dirigido el interés y la necesidad a numerosas instituciones de recopilar más información sobre sus ciudades, tanto como para obtener información del aire [8], sistemas de aparcamiento inteligente [9] o para comprobar la integridad de las edificaciones [10]. A nivel acústico, la monitorización del ruido ha permitido profundizar en el conocimiento de las ciudades. Se ha estudiado el uso redes de sensores en ciudades en recientes artículos como [6], [11], [12], [13]. En [6] se describe el uso de Raspberry Pi como nodo de una red de sensores acústicos inalámbricos en los que se lleva a cabo captura de la señal de audio, la cual es enviada a un nodo servidor para su análisis de niveles de ruido. En [11] se estudian distintas clases de sensores acústicos y se discuten diversas estrategias de implementación en redes. En [12] se detalla el funcionamiento de la red de sensores acústicos instalada en la ciudad de Barcelona, comparando una red principal con sensores de clase I y una secundaria usando sensores de un coste menor y en [13] se presenta una red de sensores acústicos para monitorización del ruido con medidas sincronizadas en distintas posiciones en tiempo real para un parámetro (*Leq*) y se analiza el rendimiento de la red. En el sensor presentado en este artículo se aporta la capacidad de la publicación de los resultados en tiempo real en la nube, calculados ejecutando los algoritmos de manera local *on-board*.

En los siguientes apartados se presenta la descripción del diseño del sensor y sus componentes, la metodología a seguir a la hora de preparar los algoritmos y la conexión a la nube para mostrar los resultados en tiempo real. Se finaliza aportando las conclusiones del trabajo realizado y de las futuras mejoras e implementaciones del sensor.

## EL PROTOTIPO

Las redes de sensores acústicos permiten monitorizar en distintos puntos en el espacio así como también en distintos momentos de tiempo. En la figura 1 se muestra una fotografía del aspecto exterior del prototipo de sensor acústico creado, el cual está basado en la plataforma Raspberry Pi. Se observa en la parte inferior de la caja estanca el micrófono externo.




**Figura 1.** Diseño final del sensor acústico encapsulado en caja estanca para su instalación en exteriores

La plataforma Raspberry Pi como núcleo principal del sensor ha sido elegida debido a su alta versatilidad, facilidad de implementación de los algoritmos usando un lenguaje de programación conocido, en este caso, C adaptado de Matlab, así como por características como su reducido tamaño y su bajo precio, permitiendo así la idea de ser una plataforma de bajo coste. También tiene un consumo energético reducido, equilibrado con una potencia de cálculo suficiente (Tabla 1), adecuada para las tareas empleadas en este proyecto.

En la figura 2 se observa un diagrama de bloques del sistema usado por el sensor acústico donde se identifican los bloques del sistema formado por la Raspberry Pi, con módulo de adquisición de sonido y adecuación de la señal así como de extracción de parámetros y el canal de salida a la nube. También se observan las conexiones de datos y conexión eléctrica.

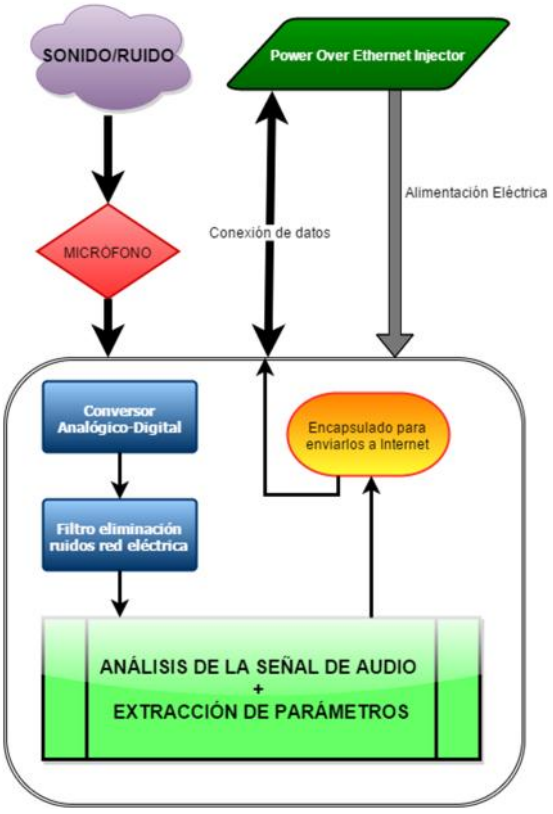



**Figura 2.** Diagrama de bloques del sistema

| *Características Raspberry Pi Model B+* | |
|---|---|
| *Precio* | *35 €* |
| *SoC (System on a chip)* | *Broadcom BCM2835 (CPU, GPU, DSP, SDRAM)* |
| *CPU* | *700 MHz single-core ARM1176JZF-S* |
| *GPU* | *Broadcom VideoCore IV 250 MHz* |
| *Memoria (SDRAM)* | *512 MB* |
| *Puertos USB 2.0* | *4 puertos* |
| *Salida de audio* | *1 salida analógica 3.5 mm minijack*<br>*1 salida digital via HDMI* |
| *Almacenamiento* | *Ranura MicroSD* |
| *Conectividad en red* | *10/100 Mbits/s Ethernet adaptador* |
| *Conectividad low-level* | *17 x GPIO (entradas/salidas de propósito general)* |
| *Consumo energético* | *600 mA (3.0 W)* |
| *Fuente de alimentación* | *5 V vía MicroUSB* |
| *Tamaño* | *85.60 mm x 56.5 mm* |
| *Peso* | *56 g* |

**Tabla 1.** Especificaciones de la Raspberry Pi B+ [DATASHEET RASPPI]

La comunicación, en este caso, con la Raspberry Pi se hace mediante una conexión Ethernet 10/100 Mbits/s, aunque también está la posibilidad de configurar una conexión inalámbrica mediante un adaptador USB WiFi (IEEE 802.11b [14]), en el caso de que no se pudiese operar en una red cableada. En el caso del sensor desarrollado, además, se ha aprovechado la capacidad de los cables Ethernet, no sólo como canal de transmisión para los datos, sino también como transmisores de corriente eléctrica [15]. De esta manera, se ha utilizado un inyector de corriente a través de Ethernet [16] en la entrada de red, y un *splitter* de corriente [17] insertado en la caja estanca. El *splitter* se encarga de separar la corriente eléctrica por un lado, para así alimentar a la Raspberry Pi, y el canal de datos por otro, para proporcionar conectividad a la placa (Figura 3). La tensión de salida es regulable en el modelo de *splitter* utilizado, y el voltaje de salida es configurado a 5 voltios. De esta manera, se evita la necesidad de incluir un transformador en la caja estanca que contiene a la Raspberry, el *splitter* y el cableado.

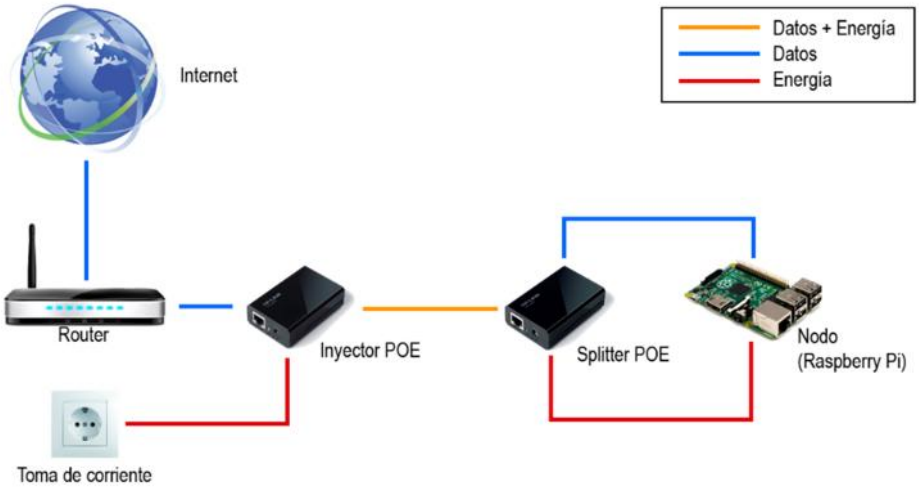



**Figura 3**. Esquema de funcionamiento de alimentación y conectividad a la red mediante POE



**Figura 4.** Interior de la caja estanca con la Raspberry Pi en primer plano, el cableado Ethernet y de alimentación, y el *splitter* debajo de la caja que contiene la Raspberry.

Otra de las grandes ventajas al trabajar con desarrollos en Raspberry Pi es la posibilidad de operar sobre un sistema operativo libre. En el caso de nuestro dispositivo, se ha utilizado una distribución *Raspbian* [18], una distribución del SO GNU/Linux para Raspberry Pi. Los algoritmos son desarrollados en Matlab y compilados en C, y éstos son ejecutados en *Raspbian*. Al estar la placa conectada en red, otra ventaja ligada al uso de este sistema operativo es la capacidad de controlar remotamente la placa a través de SSH (*Secure Shell*, en español: intérprete de órdenes segura) [19]. A través de un terminal de comandos se accede al sistema y se llevan a cabo tareas remotas como la actualización de los algoritmos o la comprobación del correcto funcionamiento del sistema, entre otras.

## USO DE MICRÓFONOS DE ELECTRÓNICA DE CONSUMO PARA LA MONITORIZACIÓN AMBIENTAL

La producción masiva de micrófonos para la electrónica de consumo ha abierto el camino para usar estos micrófonos en aplicaciones asequibles de medida de ruido. Estas aplicaciones pueden ir desde monitorización del campo sonoro hasta la validación de mapas de ruido calculados. Los micrófonos son uno de los puntos críticos en los dispositivos de medición, ya que sus características afectan directamente al resultado final de las medidas.

En un reciente estudio [20], en el que se analizan diversos micrófonos de bajo coste, se observó una desviación en las mediciones de alrededor de 1 dBA a lo largo de 6 meses de mediciones continuas. En el mismo estudio se concluye también, que los micrófonos de bajo coste de electrónica de consumo pueden ser utilizados en tareas de monitorización del campo sonoro aunque con ciertos inconvenientes. A largo plazo, en las pruebas en exteriores, los micrófonos tendían a variar sus resultados frente a los de referencia. Probablemente, debido a causas del medio como la temperatura del aire o la humedad ambiente. Aunque se concluye que estos errores son nimios ante la diferencia de precio existente entre micrófonos profesionales para mediciones y estos micrófonos. El reemplazo de los micrófonos que, tras un cierto periodo de tiempo, hayan fallado, es una opción viable. Se concluye también que la intervención humana se hace necesaria para, por ejemplo, la calibración periódica, así que la sustitución de estos micrófonos de bajo coste podría formar parte de una rutina de mantenimiento de los sensores.

En este trabajo se ha comparado la utilización de dos opciones de captación:

1- Una tarjeta de sonido USB de bajo coste junto con un micrófono dinámico.
2- Un micrófono USB electret sin tarjeta de sonido.

Se comenzó con el primer caso, usando una tarjeta de sonido externa USB junto con a un micrófono dinámico. Desde el comienzo, con esta configuración, el sonido era capturado con mucho ruido, debido a la calidad limitada de la tarjeta de sonido USB. Se hicieron distintas pruebas implementando filtros digitales para eliminar ese ruido pero finalmente se optó por el segundo caso citado, con el uso de un micrófono USB [21], el cual incorpora el módulo conversor analógico-digital (ADC) integrado. La eliminación de un paso del sonido en la cadena de transmisión redujo el ruido eléctrico, siendo fácilmente tratable usando filtros digitales (Figura 5).

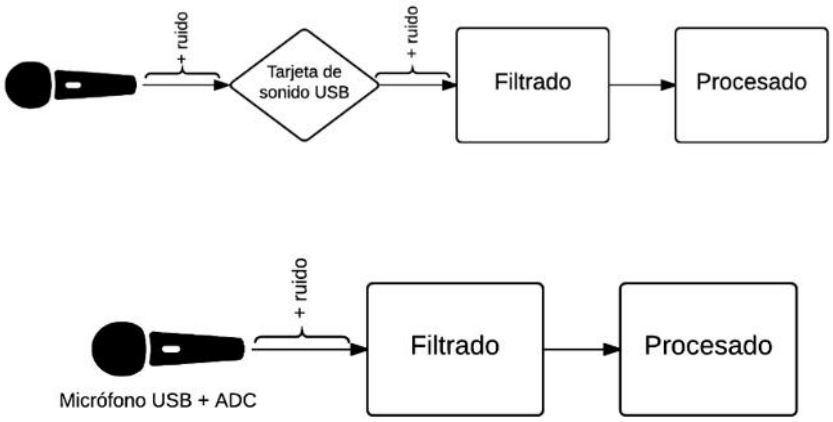



**Figura 5**. Configuraciones de captura del sonido

La tarea de calibración de los dispositivos también es una fase muy importante en el desarrollo de estos dispositivos. En el caso del sensor construido, se realizó una corrección espectral de la respuesta en frecuencia del micrófono después de una medición de la misma en laboratorio. Además, antes de la puesta en marcha se realizó una verificación y ajuste de nivel mediante un calibrador sonoro marca *Rion* [22].



**Figura 6**. Micrófono del sensor desarrollado

## IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS

Para la programación de los algoritmos se ha escogido el lenguaje de programación Matlab, usando Simulink. De esa manera, se han podido centrar los esfuerzos en el desarrollo de los algoritmos y la estructura del programa.

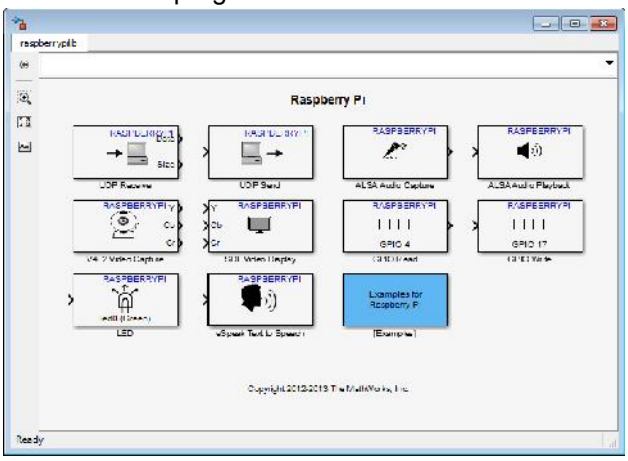



**Figura 7.** Ventana con bloques de programación de Simulink (MATLAB) para Raspberry Pi.

La captura del audio se hace a través de un bloque, *ALSA Audio Capture* (ALSA, *Advanced Linux Sound Architecture)* que usa un componente del núcleo Linux destinado a proveer al sistema de funcionalidades de sonido como la configuración automática de tarjetas de sonido y el manejo de los dispositivos en un solo sistema Linux [23]. Se puede configurar como características de la salida del sonido a capturar la frecuencia de muestreo y el tamaño de *frame* (número de muestras por ventana). Configurada correctamente la adquisición de audio, se realiza un acondicionamiento de la señal donde se hace un filtrado digital para la eliminación del ruido proveniente de la red eléctrica.

La señal de audio en escala lineal es convertida a escala logarítmica y corregida usando la calibración mencionada en el apartado relativo a la adquisición de audio. Usando bloques en Simulink en los que se pueden integrar funciones de MATLAB, se programan los algoritmos encargados de extraer los distintos parámetros acústicos de la señal de audio.

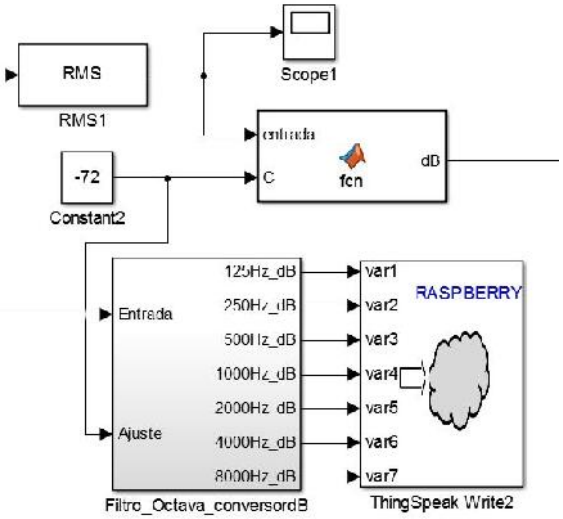



**Figura 8**. Bloque de función de MATLAB en Simulink.

En este caso se han elegido los parámetros:

- Nivel de presión sonora instantáneo.
- Percentiles L10, L50 y L90.
- Nivel de presión sonora equivalente.
- Nivel de presión sonora en tercios de octava (desde 125 Hz hasta 8000 Hz).
- Parámetros psicoacústicos *loudness* y *sharpness* [24].

Los esfuerzos en esta primera versión del sensor han sido enfocados en la optimización de los cálculos de los parámetros antes mencionados y la correcta presentación y publicación de los datos obtenidos a través de Internet en tiempo real. Para el envío de resultados en tiempo real a la nube, se usa otro bloque de Simulink que agiliza la tarea de realizar la conexión con el gestor de la base de datos. El funcionamiento más detallado de esta conexión se presenta en el siguiente apartado.

## ACCESIBILIDAD Y GESTIÓN DE LOS DATOS

La potencia real de este tipo de sistemas analizadores de audio reside en la capacidad de llevar a cabo los cálculos en distintas posiciones en distintos instantes de tiempo, y también en la capacidad para estar interconectados unos con otros [25]. Esto dota a los nodos de conectividad, permitiendo su monitorización y gestión remota [26]. Un paso más allá es la conexión directamente con la nube y los servicios que en ella se pueden gestionar.

Al sensor desarrollado se le ha dotado de conectividad con Internet mediante la conexión Ethernet y se ha aprovechado esta conexión a la nube para almacenar y mostrar los resultados de los parámetros acústicos calculados sobre una plataforma web para el Internet de las Cosas llamada *ThingSpeak*. En Matlab, a través de Simulink, indicando la API Key de escritura, el número de variables a enviar y la dirección de actualización se configura la interconexión del sensor Raspberry con *ThingSpeak* (Figura 9).

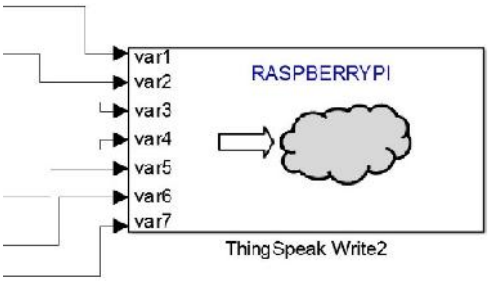



**Figura 9.** Bloque Simulink de conectividad con ThingSpeak

Cada canal incluye hasta 8 campos que pueden contener cualquier tipo de datos. Una vez que los datos son recogidos, éstos pueden ser visualizados de manera privada o pública, a través de aplicaciones de la plataforma *ThingSpeak* (Figura 10).

Usando las posibilidades de visualización de *ThingSpeak* se han creado diversas gráficas para visualizar en tiempo real los datos que el sensor está calculando y enviando a la nube. También se pueden extraer los datos de un canal en diversos formatos (JSON, XML o CSV) para su análisis *offline o backups*.

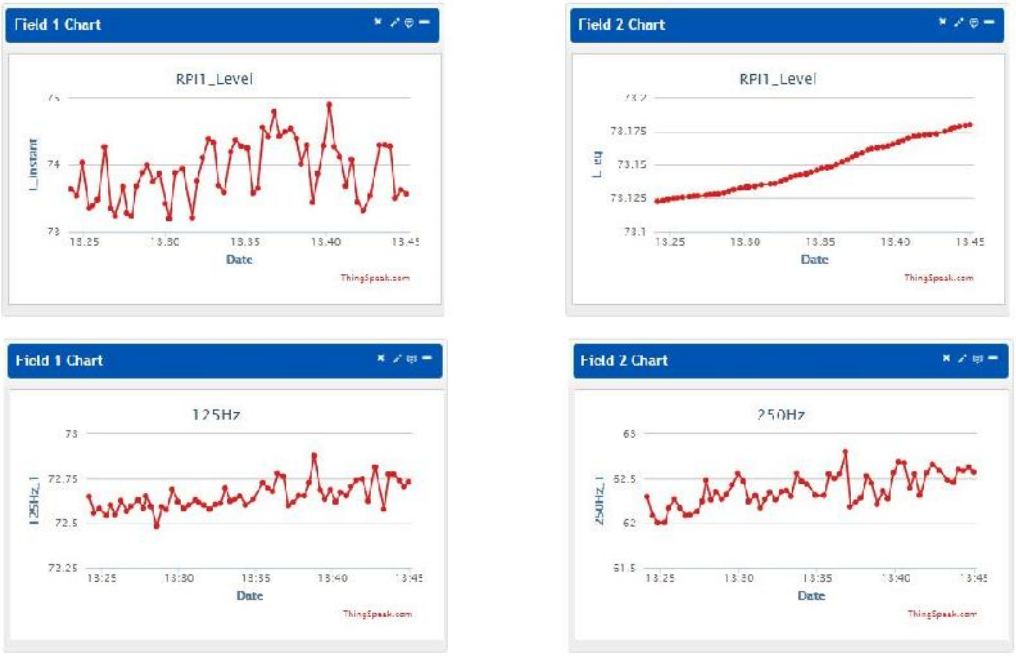



**Figura 10.** Ejemplos de visualización online de variables en la plataforma ThingSpeak

Los datos de uno de los sensores instalados están disponibles de manera pública y pueden ser consultados online [27, 28].

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito el diseño de un sensor, sus componentes y la metodología a seguir a la hora de preparar los algoritmos, así como la conexión a la nube para mostrar los resultados en tiempo real. En otros trabajos de los mismos autores se han propuesto las plataformas de bajo coste para la adquisición de sonido ambiental, pero en este artículo se ha presentado un sensor funcional con las características añadidas de cálculos *on-board* y muestra los resultados en tiempo real en la nube. Se concluye que la plataforma Raspberry Pi es viable para llevar a cabo cálculos *on-board* de parámetros más complejos sin perder funcionalidades de conectividad en tiempo real.

La plataforma y los métodos elegidos para su programación ofrecen varias ventajas como una gran versatilidad, facilidad de implementación de algoritmos, un bajo precio y una alta facilidad para integrarla en sistemas para instalación en exteriores, teniendo así una gran potencia como nodo de una red de sensores.

En trabajos futuros se pueden realizar nuevos algoritmos de cálculo de parámetros avanzados como para los parámetros psicoacústicos *roughness* y *fluctuation strength* junto con la optimización de *loudness* y *sharpness*, obteniendo los resultados en tiempo real calculándolos en Raspberry y no en cálculos posteriores, ya que se ha concluido que la plataforma tiene potencia de cálculo suficiente. Por otro lado, una mejora en la visualización de los parámetros publicados. También se harán pruebas usando micrófonos MEMS para la adquisición de sonido.

**AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo está conjuntamente apoyado por los fondos del Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte MECD español y FEDER europeo bajo el proyecto ref. TEC2012-37945-C02-01 y la UCAM Universidad Católica San Antonio bajo el proyecto ref. PMAFI-02-14.

**REFERENCIAS**

[1] Benini, L., & De Micheli, G. (2002). Networks on chips: a new SoC paradigm.*Computer*, *35*(1), 70-78.
[2] Raspberrypi.org, (2015). *Raspberry Pi Hardware - Raspberry Pi Documentación online*. Disponible: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi [Consultado 2 Sep. 2015]
[3] Richardson, M., & Wallace, S. (2012). *Getting started with raspberry PI*." O'Reilly Media, Inc.".
[4] Upton, E., & Halfacree, G. (2014). *Raspberry Pi user guide*. John Wiley & Sons.
[5] Tso, F. P., White, D. R., Jouet, S., Singer, J., & Pezaros, D. P. (2013). The Glasgow raspberry Pi cloud: A scale model for cloud computing infrastructures. *Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems*, 108–112. doi:10.1109/ICDCSW.2013.25
[6] Segura-Garcia, J., Felici-Castell, S., Perez-Solano, J. J., Cobos, M., & Navarro, J. M. (2015). Low-Cost Alternatives for Urban Noise Nuisance Monitoring Using Wireless Sensor Networks. *Sensors Journal, IEEE*, *15*(2), 836-844.
[7] Noriega, J. E., Navarro, J. M., Felici, S., & Segura, J. (2014). Monitorización del Aislamiento a Ruido Aéreo Mediante Redes de Sensores Inalámbricas. *Tecniacústica 2014.*
[8] Dekoninck, L., & Botteldooren, D. (2015). Sound sensor network based assessment of traffic noise, and air pollution. *Euronoise 2015*, 2321–2326.
[9] Chinrungrueng, J., Sunantachaikul, U., & Triamlumlerd, S. (2007, January). Smart parking: An application of optical wireless sensor network. In *Applications and the Internet Workshops, 2007. SAINT Workshops 2007. International Symposium on* (pp. 66-66). IEEE.
[10] Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., & Turon, M. (2007, April). Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on* (pp. 254-263). IEEE.
[11] Manvell, D. (2015). Utilising the Strengths of Different Sound Sensor Networks in Smart CityNoise Management. *Euronoise 2015*, 2303–2308.
[12] Farrés, J. C. (2015). Barcelona noise monitoring network. *Euronoise 2015*, 218–220.
[13] Hakala, I. (2015). Area-based environmental noise measurements with a wireless sensor network. *Euronoise 2015*, 2351–2356.
[14] IEEE Standards Association & others (2001). *IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.* IEEE
[15] Mendelson, G. (2004). All You Need To Know About Power over Ethernet (PoE) and the IEEE 802.3 af Standard. *Internet Citation,[Online] Jun*.
[16] Tp-link.com. (2015). *Inyector PoE TL-POE150S* . Retrieved 7 September 2015, from http://www.tp-link.com/ar/products/details/?model=TL-POE150S#over
[17] Tp-link.com. (2015). *Splitter PoE TL-POE10R*. Retrieved 7 September 2015, from http://www.tp-link.com/ar/products/details/?categoryid=234&model=TL-POE10R#over
[18] Raspbian.org,. (2015). *FrontPage - Raspbian*. Retrieved 8 September 2015, from https://www.raspbian.org/
[19] Es.wikipedia.org,. (2015). *Secure Shell*. Retrieved 8 September 2015, from https://es.wikipedia.org/wiki/Secure_Shell
[20] Van Renterghem, T., Thomas, P., Dominguez, F., Dauwe, S., Touhafi, A., Dhoedt, B., & Botteldooren, D. (2011). On the ability of consumer electronics microphones for environmental noise monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, *13*(3), 544-552.
[21] Tbone-mics.com,. (2015). *Productdetails - t-bone*. Retrieved 6 September 2015, from http://www.tbone-mics.com/en/product/information/details/-d9d6e87219/
[22] NC-74 Datasheet - http://www.noise-and-vibration.co.uk/files/pdfs/NC-74.pdf
[23] Alsa-project.org,. (2015). *AlsaProject*. Retrieved 3 September 2015, from http://www.alsa-project.org/main/index.php/Main_Page
[24] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
[25] Mainetti, L., Patrono, L., & Vilei, A. (2011, September). Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey. In *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
[26] Luo, J., Chen, Y., Tang, K., & Luo, J. (2009, December). Remote monitoring information system and its applications based on the Internet of Things. In*BioMedical Information Engineering, 2009. FBIE 2009. International Conference on Future* (pp. 482-485). IEEE.
[27] Thingspeak.com,. (2015). *RPi1_Octavas - ThingSpeak*. Retrieved 8 September 2015, from https://thingspeak.com/channels/38907
[28] Thingspeak.com,. (2015). *RPI1_Level - ThingSpeak*. Retrieved 8 September 2015, from https://thingspeak.com/channels/38912

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# TRAINING AN ANOMALOUS NOISE EVENT DETECTION ALGORITHM FOR DYNAMIC ROAD TRAFFIC NOISE MAPPING: ENVIRONMENTAL NOISE RECORDING CAMPAIGN

Referencia PACS: 43.50.Rq,

Francesc Alías[1], Joan Claudi Socoró[1], Xavier Sevillano[1], Luca Nencini[2]
[1]GTM - Grup de Recerca en Tecnologies Mèdia, La Salle - Universitat Ramon Llull
Quatre Camins 30, 08022 Barcelona, Spain, Tel. +34932902440, E-mail: falias@salleurl.edu; jclaudi@salleurl.edu ; xavis@salleurl.edu
[2]Bluewave Acoustics, E-mail: nencini@blue-wave.com

## ABSTRACT
The LIFE+ DYNAMAP project aims at creating dynamic road traffic noise maps automatically upon the levels measured by a low cost sensors network. To ensure these maps reflect the acoustic impact of road infrastructures, it is necessary to exclude other acoustic sources (e.g. aircrafts, industries, etc.) from the noise level computation. To that end, an anomalous noise event detection algorithm based on supervised learning techniques is designed. This paper describes the recording campaign conducted in the two pilot areas of the DYNAMAP project in Rome and Milan, aimed at collecting road traffic and anomalous noise event samples to train the algorithm.

## INTRODUCTION
Given the negative effects of continued exposure to high traffic noise levels [1], European authorities have driven several initiatives to study, prevent and reduce the effects of exposure of population to traffic noise. An example is the European Noise Directive (END 2002/49/EC), focused on the creation of noise level maps [2]. In order to take into account changes in environmental conditions, these maps have to be updated with a 5-year periodicity, which entails a time and cost consuming process that is undertaken by local and regional bodies of government.

In an attempt to simplify and reduce the cost of updating road traffic noise maps, the LIFE+ DYNAMAP project (http://www.life-dynamap.eu/) aims at automating the whole process. To that end, the main goal of the project is to develop a network of low cost acoustic sensors and an integrated system for data acquisition and processing able to detect, report and map the acoustic impact caused by road infrastructures in real time.

To validate the proposed approach, during the LIFE+ DYNAMAP project two demonstrative pilot systems will be implemented and tested for at least one year in the cities of Milan and Rome. The first one will be located inside the city of Milan, thus allowing to test the system in an urban scenario, while the second one will be located along a major road surrounding the city of Rome (the A90 highway), making it possible to validate the performance of the system in a suburban environment. More specifically, in previous stages of the project, a support tool was designed to choose the specific pilot areas where the demonstrative systems will be implemented [3]. Taking into account several environmental and infrastructural factors (e.g. noise levels, population density, number of dwellings, etc.), the candidate areas were ranked based on scores dependent on those attributes, selecting Milan's district 9 as the urban pilot area [4], and a total of 17 critical areas located along the A90 highway in Rome for the suburban setting [3].

However, the automation of the road traffic noise data gathering and analysis processes entails several consequences. One of them has to do with the fact that acoustic events produced by non-

traffic sources that could alter the measured noise levels (e.g. an air-craft flying over, nearby industries or railways, road works, church bells, animals, etc.) should be detected and eliminated from the noise map computation to provide a reliable picture of the actual road traffic impact. For this reason, it is necessary to devise strategies to automatically identify anomalous noise events captured by the network of sensors.

To that end, the LIFE+ DYNAMAP project includes the development of an Anomalous Noise Event Detection (ANED) algorithm to detect such events and ensure that the noise levels represented on the dynamic maps only reflect road traffic noise. In its current version, the ANED algorithm follows a semi-supervised machine learning approach that requires the construction of a reliable acoustic model of road traffic noise [5].

Given the diversity of operating scenarios (i.e. urban and suburban), it is necessary to build acoustic models that faithfully reflect the characteristics of road traffic noise in both types of settings. For this reason, an environmental noise recording campaign was conducted on the pilot areas where the two demonstrative versions of the DYNAMAP system will be implemented.

As a result of the recording campaign, nearly 10 hours of audio were collected, labeled and processed to train the mentioned acoustic model for subsequent development stages of the ANED algorithm. The primary goal of this paper is to describe all the procedures related to the recording campaign in the following terms. First, section 2 presents the main technical aspects of the recording campaign. Next, section 3 is devoted to the presentation of the audio post-processing tasks conducted on the recorded audio. Finally, section 4 outlines the conclusions and future steps towards the implementation of the ANED algorithm.

## RECORDING CAMPAIGN

The main goal of the recording campaign was to collect widely diverse road traffic noise samples in their actual environment conditions to train, validate and test the current version of the ANED algorithm (see [5] for more details). To that effect, several recordings were conducted between the 18$^{th}$ and 21$^{st}$ of May 2015 in specific locations of the two pilot areas of the LIFE+ DYNAMAP project. The selection of these locations was based on obtaining representative samples of the traffic conditions and acoustic characteristics of the pilot areas.

Moreover, it is worth noting that the monitoring network of sensors of the LIFE+ DYNAMAP system will be composed of low cost acoustic sensors. The recordings were conducted with two measuring devices simultaneously: one low cost sensor from Bluewave [6] connected to a ZOOM H4n digital recorder, (see Figure 1.b) and a Bruel&Kjaer 2250 sonometer (see Figure 1.a), used as a reference. These dual recordings were conducted to allow the validation of the low cost acoustic sensor performance with respect to the sonometer in the near future. The recording setup was the following:

- Situation of both measuring devices: 50 cm distance between them.
- Sampling: 48KHz sampling rate with 24 bits/sample,
- Sensitivity verification using a 94 $dB_{SPL}$,1 KHz calibration tone.
- Clapping: in order to align the audio recordings from both measuring devices, a sequence of 5 sec. of clapping was performed between both sensors with a separation that assured a very good signal to noise ratio despite the environmental noise.
- Gain adjustment: the input gain of each recorder was selected to guarantee enough room for in site audio dynamics (no saturation).
- Installation: both recording systems were installed on a tripod and included a windscreen to protect the sensor from wind.

- Orientation: the final orientation of the DYNAMAP low cost sensors with respect to the traffic flow is still undefined. For this reason, recordings were made with three orientations: putting the sensor in the direction of the traffic –forward orientation–, in the opposite direction –backward–, or orthogonal to the vehicles flow. Moreover, three elevation angles of the sensors positions were also employed: 0º, 45º and -45º.



(a) Bruel&Kjaer 2250 sonometer. (b) Low-cost measuring device.

**Figure 1** – Recording equipment.

During the 18th and 19th of May 2015, recordings were conducted in 6 sites along the A90 highway in Rome (see Figure 2), which constituted a representative subset of the 17 sites in this pilot area according to the following four classes [3]: single road; additional crossing or parallel roads; railway lines running parallel or crossing the A90 motorway; and a complex scenario including multiple connections. Concretely, the recording equipment were installed in 6 highway portals owned by ANAS S.p.A (see Figure 3), a partner of the DYNAMAP project that is a government-owned company under the control of the Ministry of Infrastructure and Transport in Italy. During these recordings, the weather conditions were sunny, without rain and with an average temperature of 19ºC.

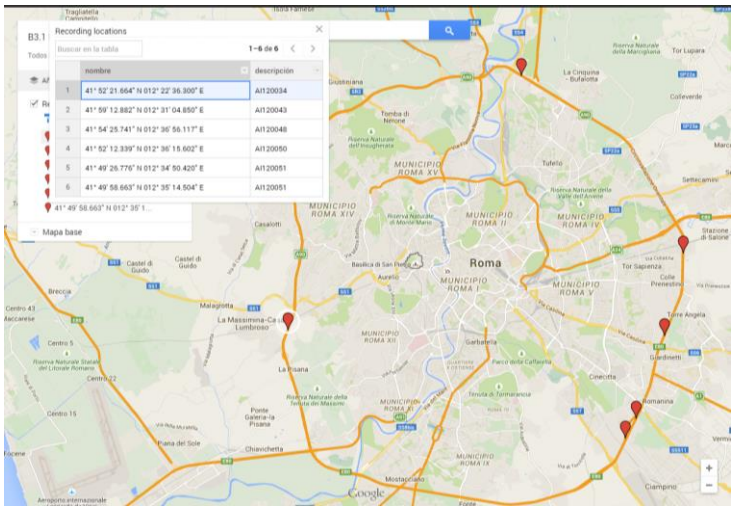



**Figure 2** – Locations of the suburban recordings in the A90 highway surrounding Rome.



**Figure 3** –Examples of the recording setup installed in the ANAS S.p.A. portals situated on the A90 highway surrounding Rome.

From the 20th to the 21st of May 2015, we moved to the Milan's district 9 pilot area to collect urban road traffic noise samples in 12 locations at different times of day and night (see Figure 4).

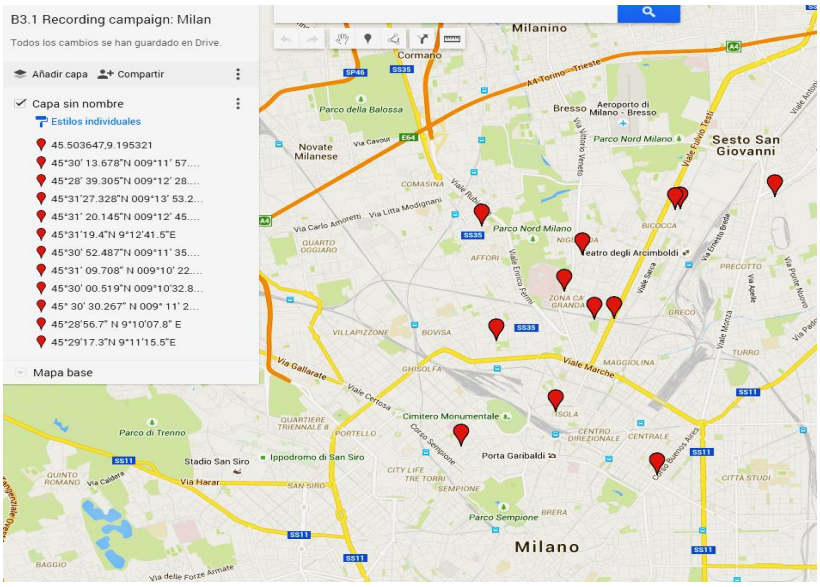



**Figure 4** – Locations of the urban recordings within the Milan municipality.

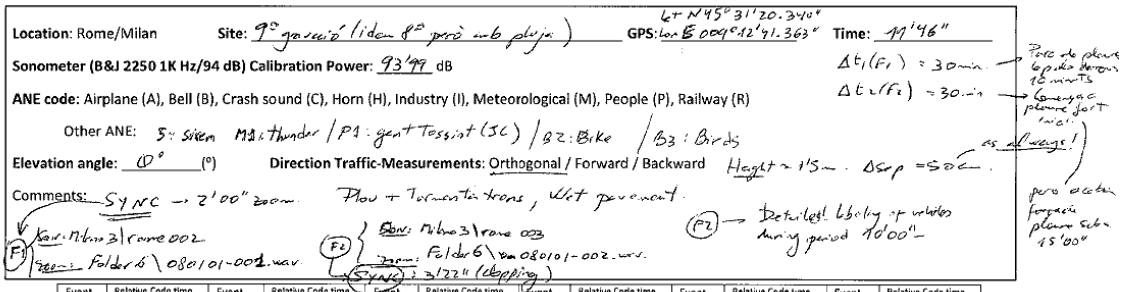
Concretely, the twelve locations correspond to the following specific locations:

1. Near hospital location, including tramways and low traffic.
2. Very low traffic one-way road.
3. Highly dense but slow traffic, with tramways, stone pavement, traffic lights and retentions.
4. Railways, very low traffic.
5. Tram and railways, fluid fast traffic multilane.
6. City center, shopping road, crossroad with traffic lights. Wet pavement.
7. Night very low fluid traffic two-way road (multilane).
8. Fluid traffic two-way road near university (multilane).
9. The same location as location number 8 but with wet pavement.
10. Residential area, fluid traffic, narrow two-way road.
11. Near school narrow two-way road with very low density traffic.
12. Low traffic, one-way narrow street near city council building.

During the Milan recordings, the weather was quite sunny, except in the second day when thunderstorms occurred during one of the recordings, making it possible to record the noise of thunders as well as road traffic noise with wet pavement.

Furthermore, in order to help the subsequent labeling and post-processing, the recordings were accompanied with a measurement annotation sheet including the following information (see Figure 5): the site location and time, the calibration tone power measured by the sensors, the elevation angle, and the direction of traffic measurements (facing forwards or backwards). Moreover, the annotation sheet allowed the manual pre-labeling of anomalous events occurring during the recording periods, together with some other particular annotations of the recording context (e.g., new types of acoustic events, or weather conditions).

As a result of the four-day recording campaign between Rome and Milan, a total 9 hours and 51 minutes of audio were collected and prepared for the subsequent labelling and post-processing phase, which is described in the next Section.




| Event | Relative Code time hh:mm:ss | Event | Relative Code time | Event | Relative Code time | Event | Relative Code time | Event | Relative Code time | Event | Relative Code time |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 4'44" | M1 | 5'05" | M1 | 7'43" | P1 | 9'54 | M1/A | 10'29" | P1 | 11'46" |
| M1 | 12'40" | M1 | 13'17" | H | 13'40" | H | 15'19" | H | 16'56" | H | 19'29" |
| M1 | 20'37" | M1 | 21'42" | M1 | 23'52" | M1 | 24'10" | H | 25'17" | B2 | 25'30 |
| M1 | 26'32" | S | 27'44"-50" | M1 | 28'57" | M1 | 1'37" | M1 | 1'57" | M1 | 4'33" |
| H | 5'59" | H3 | 6'10"-6'20" | M1 | 9'17" | H | 18'38" | B3 | 18'56" | B3 | 20'25" |
| B3 | 20'47" | H | 22'00" | P | 22'44" | H | 23'59" | M1 | 23'07" | B3 | 24'22" |
| M | 25'57" | H | 76'01" | H | 26'32" | | | | | | |

**Figure 5** – Example of the measurement annotation sheet.

## AUDIO DATABASE GENERATION

After finishing the recording campaign, a post-processing phase was conducted in order to normalize and label all the recorded audio files, and export the audio clips according to a designed taxonomy of the acoustic database specifically conceived for the ANED. To that effect, we used the Audacity freeware software.

A total of 18 audio projects were generated, one for each session during the recording campaign. Six projects were related to the Rome recordings, and twelve to the Milan ones. In the next paragraphs, the two main procedures performed during the post-processing of the audio recordings are described, divided into two steps: normalization, and labeling plus audio clip export.

**Normalization step**: For each audio project, the audio files gathered from the two recording devices were imported. Next, the amplitude of the audio files was normalized to make all the noise recordings uniform. This is a key process to avoid biasing the performance of the ANED algorithm. To this end, the amplitude gain was set to adjust the amplitude of the 1 kHz calibration tone of 94dB$_{SPL}$ to -30 dB full scale in the audio signal spectrum. For that, we used the Audacity spectrogram analysis tool with a 512-points FFT and a Hanning window of 10.6 ms. On the one hand, this setting avoids the clipping of the regions of interest along the recordings, and, on the other hand, it allows obtaining a relevant audio signal amplitude to perform the posterior subjective labeling comfortably. Secondly, both parallel audios were manually aligned thanks to the clapping passages at the beginning of each recording session, using the clap impulsive signals (of 5 ms length each in average) to reliably align the parallel recordings through simple visual inspection. This process was followed by a subsequent perceptual validation stage based on assigning each audio to a different stereo channel (i.e., the signal from the low cost sensor to the left channel and the signal recorded by the sonometer to the right channel) to ensure there was no perceived delay in the audio.

Figure 6 shows an example of an Audacity project to illustrate the processes just described. The two tracks correspond to the signals simultaneously recorded by the two devices in the same location. The amplitude normalization adjusts the amplitude of the calibration tone (corresponding to the selected area in the first track) to -30dB full scale with the help of the spectrogram in the bottom-right region of the figure. The time alignment between both tracks is conducted by zooming the clapping area (interval between seconds 35 and 38) and delaying the second track with respect the first one, as shown in the bottom-left part of the figure.

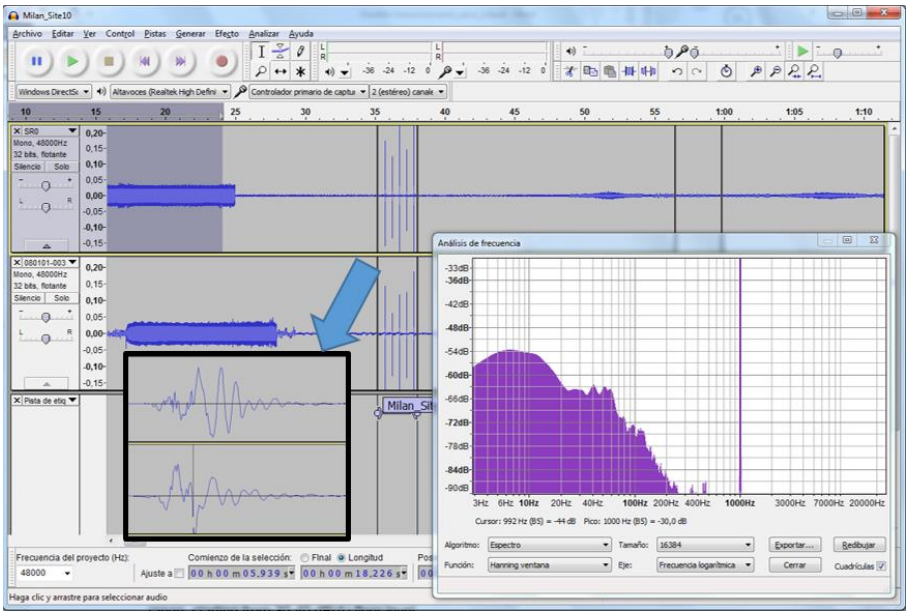



**Figure 6** – Example of an Audacity audio project during the normalization process.

**Audio labeling and clip exporting step**. The step of labeling the audio files was toilsome and time consuming, as it entailed listening to nearly 10 hours of recordings to label audio passages according to a predefined annotation taxonomy that distinguishes among the following environmental noise events: road traffic noise (RTN), background noise (BCK) and anomalous events (ANE). RTN labels were assigned to all audio regions containing the pass-by of road vehicles, while BCK labels were reserved to those passages where it was difficult to identify the noise coming from vehicles since they contain the background noise of the city (e.g., quiet noise

in a one-way street when no vehicles are present, but some distant traffic noise is perceived). In order to ensure that the ANED algorithm detects anomalous events appropriately, it is necessary to train it using samples of both RTN and BCK classes.

In turn, anomalous events (ANE) were labeled by using different subcategories, taking into account the diversity of acoustic phenomena gathered during the environmental recording campaign. These subcategories were defined in order to enrich the description of the occurred acoustic events, and were defined using the following labels (in descendent order of occurrence during the recording sessions): *peop* (people talking), *musi* (music in car or in the street), *tram* (stop, start and pass-by of tramways or trains), *sire* (sirens of ambulances, police, etc.), *stru* (noise of portals structure derived from its vibration, typically caused by the passing-by of very large trucks), *horn* (horn vehicles noise), *brak* (noise of brake or cars' trimming belt), *thun* (thunder storm), *bird* (birdsong), *trck* (noise when trucks or vehicles with heavy load passed over a bump), *door* (noise of house or vehicle doors, or other object blows), *airp* (airplanes), *wind* (noise of wind, or movement of the leaves of trees), *bike* (noise of bikes), *mega* (noise of people reporting by the public address station), *busd* (opening bus or tramway door noise), *chai* (noise of chains), and *dog* (barking of dogs).

All the ANE labels were associated to time intervals of the audio recordings only if they were easily identified subjectively. However, when an acoustic event was perceived but with high difficulty, that time region was marked with *cmplx* label (i.e., it was hard to distinguish the event from the background road traffic noise or from other acoustic events that simultaneously occur). Furthermore, noise of tyres when street bumps were considered within the RTN category.

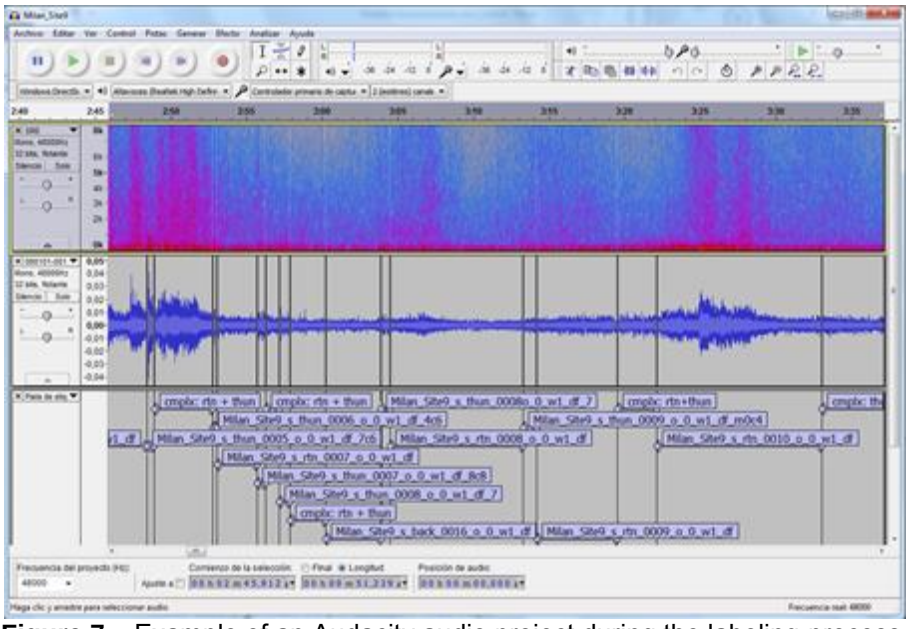


**Figure 7** – Example of an Audacity audio project during the labeling process.

Figure 7 illustrates how the labelling process was conducted. To that effect, we listened to the two available audio tracks (one for each recording device), which were also visualized using spectrogram and time waveforms (see the two top tracks of Figure 7). The third track included the corresponding labels for the analyzed audio passage, where basically road traffic noise (*rtn*), background noise (*bck*) and thunders (*thun*) labels were used. Also, some regions labeled as complex scenes containing a mix of road traffic noise and thunders (*cmplx*: *rtn* + *thun*) are shown. Each one of the audio clips that was not labeled as a complex passage was exported as an independent .wav file (48 KHz and 16 bits/sample).

Next, the labeled audio clips were exported as independent *.wav* audio files using a sampling rate of 48 KHz and 16 bits/sample. Each filename contained the following parts: type of sensor (*s*: Bruel & Kjaer 2250 Sonometer, or *z*: Zoom H4n recorder plus Bluewave sensor), type of event (*rtn*, *bck*, *peop*, *musi*, *tram*, *sire*, *stru*, *horn*, *brak*, *thun*, *bird*, *trck*, *door*, *airp*, *wind*, *bike*, *mega*, *busd*, *chai*, or *dog*), order of appearance of this type of event in the same audio project (from 0 to 100), direction of measurement in relation with the traffic direction (*f* : forward, *b*: backward, *fb*: in both directions, or *o*: orthogonal), elevation angle of the measurements (0º, 45º or -45º), type of road (*h*: highway, *r1*: two-way wide road, *r2*: one-way wide road, *r3*: two way narrow road, *r4*: one way narrow road, *w1*: two-way wide road with wet pavement, *w3*: two-way narrow road with wet pavement), type of traffic (*df*: dense and fluid, *dr*: dense with retentions, *l*: low, or *vl*: very low). Additionally, ANE audio clips were also tagged with a computation of the relative amount of ANE amplitude with respect to BCK noise in dBs manually. This computation was performed individually for each audio clip, taking into account the signal to background noise ratio along the ANE with respect to a portion of audio of at least 30 immediately before or after the occurrence of the anomalous event. This extra information was added to include valuable information for the training step of the ANED algorithm (i.e., for excluding from training the anomalous events that have a very low amplitude with respect the background noise).

## CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this work, we have described the environmental noise recording campaign performed in May 2015 in the two pilot areas of the LIFE+ DYNAMAP project: Rome and Milan. The main goal of the campaign has been collecting enough representative acoustic data to train, validate and test the ANED algorithm included in the project to avoid including noise sources different from traffic when computing noise maps dynamically. After obtaining nearly 10 hours of audio, subsequent labelling and post-processing has led to 7 hours, 48 minutes and 38 seconds of RTN, 38 minutes and 37 seconds of BCK, and 25 minutes and 54 seconds of ANE. The rest of the recorded audio was labeled as complex audio passages. During this work, we have realized that the latter passages will need further analyses. Future work will be focused on training the ANED with the obtained acoustic database and validating its performance with respect to the results obtained previously based on synthetic databases.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research presented in this work has been partially supported by the LIFE DYNAMAP project (LIFE13-ENV/IT/001254). We would like to thank our colleagues in ANAS S.p.A. and Università de Milano-Biccoca for their support during the recording campaign.

## BIBLIOGRAPHY

[1] W. Babisch; “Transportation noise and cardiovascular risk”, Noise&Health, 10, pp. 27–33, 2008.

[2] EU Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise, Official Journal of the European Communities, L189/12, July 2002.

[3] S. Radaelli, P. Coppi, A. Giovanetti, R. Grecco; “The LIFE DYNAMAP project: automating the process for pilot areas location”, Proc. 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.

[4] G. Zambon, R. Benocci, A. Bisceglie; “Development of optimized algorithms for the classification of networks of road stretches into homogeneous clusters in urban areas”, Proc. 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.

[5] J. Socoró, G. Ribera, X. Sevillano, F. Alías; “Development of an anomalous noise event detection algorithm for dynamic road traffic noise mapping”, Proc. 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.

[6] L. Nencini; “DYNAMAP monitoring network hardware development”, Proc. 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# VALENCIA CIUDAD INTELIGENTE: CONTROL DE LA CALIDAD ACÚSTICA

PACS:

Ana Viciano Pastor
Jefa de Servicio de Calidad y Análisis Medioambiental, Contaminación Acústica y Playas
Ayuntamiento de Valencia

**ABSTRACT**

El Ayuntamiento de Valencia ha apostado fuerte en lo que a estrategia de Ciudad Inteligente se refiere.

En este sentido forma parte de la Red Española de Ciudades Inteligentes (RECI Valencia cuyo objetivo es intercambiar experiencias y trabajar conjuntamente para desarrollar un modelo de gestión sostenible y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Por eso, ha desarrollado un proyecto que es “Valencia, Smart City”. Del que parte de él, por lo que ha contaminación acústica se refiere, vamos a desarrollar brevemente en el presente simposio. Pero

## ¿Qué ES UNA CIUDAD INTELIGENTE?

“Una ciudad inteligente es aquella que sabe aprovechar las posibilidades que ofrecen las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) para facilitar la vida de los ciudadanos, disponer de una administración más cercana y accesible, y hacer más eficiente y sostenible la gestión de los servicios municipales. En definitiva, para que una ciudad pueda denominarse “inteligente” ha de apostar por la eficacia y la optimización de los procesos para reducir costes y aumentar la calidad de los servicios. Pero también ha de contar con ciudadanos “inteligentes”, dotados de las competencias digitales necesarias para poder beneficiarse de dichos servicios.

Dentro de la Red Española de ciudades inteligentes se han creado cinco grupos de trabajo en los que Valencia participa activamente:




La materia que hoy tratamos se encuentra enmarcada dentro del Grupo III “Medio Ambiente, Infraestructura y Habitabilidad”

Dentro del Ayuntamiento de Valencia, el departamento que dirijo, por lo que respecta a la calidad acústica, está centrado en el control de la calidad del ruido ambiental desarrollando las siguientes competencias:

- Elaboración y aprobación de los Planes de Acción en materia de Contaminación Acústica, así como sus posteriores revisiones y modificaciones
- Elaboración del Mapa del Ruido.
- Elaboración y aprobación de los Planes de Acción en materia de Contaminación Acústica, así como sus posteriores revisiones y modificaciones
- Coordinación del Órgano Gestor de la Contaminación Acústica.
- Asesoramiento técnico de instrumentación acústica en los distintos Servicios del Ayuntamiento.
- Control y vigilancia de niveles sonoros en el medio exterior (RUIDO AMBIENTAL) y de vibraciones. Gestión y Explotación de la Red de Vigilancia Acústica.
- Control y vigilancia, propuesta medidas y realización informes sonométricos en *ZAS (Zona Acústicamente Saturada).*
- Difundir y fomentar entre la ciudadanía el mayor conocimiento de los temas relacionados con la Contaminación Acústica por medio de cursos, talleres, campañas de formación, así como la concienciación y sensibilización en la lucha contra la Contaminación Acústica.

Aunque son muchas las iniciativas que desde el Ayuntamiento de Valencia se desarrollan dentro del proyecto Smart City, el objetivo de este simposio es poner de manifiesto aquellas herramientas y actuaciones más relevante que permiten definir, desde el punto de vista de la contaminación acústica, que Valencia es una Ciudad Inteligente.

Desde hace tiempo, mucho antes de que se pusiera en marcha el proyecto de Smart City, Valencia ha sido pionera tanto en el cumplimiento de la normativa (puesta en marcha de los Planes de Acción, elaboración de los Mapas de Ruido, regulación por Ordenanza de la materia…) así como en la utilización de instrumentación de calidad a la hora de desarrollar los diferentes trabajos de control y vigilancia.

La puesta en marcha de todas estas iniciativas y la utilización de estos medios han permitido que Valencia haya puesto en marcha una estrategia que hoy en día permita hablar de Ciudad Inteligente. Una ciudad inteligente no se traduce sólo en el empleo de una tecnología puntera o una puesta a disposición de la misma para el desempeño de un cometido o una tarea sino que se trata de adoptar una serie de medidas y elaborar un sistema de gestión con distintas herramientas que permitan afirmar que en la gestión global de una materia se está llevando a cabo una serie de trabajos que ayudan tanto a la toma de decisiones, a un desarrollo más eficaz y eficiente de una tarea así como a ofrecer una información y una participación más activa del ciudadano en la toma de decisiones y en la gestión de un determinado servicio.

Apoyaremos nuestra exposición en el desarrollo de tres pilares fundamentales:

1. Herramientas de gestión
2. Herramientas tecnológicas
3. Actuaciones inteligentes que mejoran la calidad acústica de la Ciudad.

## 1.-HERRAMIENTAS DE GESTION

### 1.1. MEDIOS MATERIALES

El Ayuntamiento de Valencia cuenta para el control de la contaminación acústica con una serie de instrumentación que pone a disposición de los inspectores, policía local y personal en general que directa o indirectamente trabajan en esta materia.

Entre esta instrumentación destaca:



Sonómetro Integrador-promediador B&K 2236. Instrumentación portátil utilizada para mediciones de ruido ambiental y en inspecciones acústicas. Permite almacenar los parámetros LAeq, LAmax y LAmin, durante varios días.



Sonómetro Integrador-promediador B&K 2238. Instrumentación portátil de similares características al anterior incorporando análisis espectral secuencial.



Sonómetro Integrador-promediador B&K 2260. Instrumentación portátil de análisis espectral continuo con módulos que permiten realizar mediciones de tiempos de reverberación y ensayos de acústica arquitectónica y aislamientos.



Sonómetro Integrador-promediador B&K 2250. Instrumentación portátil de última generación con análisis espectral continuo, con módulos para mediciones de nivel de evaluación en las inspecciones, según normativa vigente (impulsos, tonos puros, baja frecuencia).



Sonómetro Cesva SC-10. Instrumentación para medición de ruido ambiental ubicada en el interior de las estaciones remotas.



Sonómetro Integrador-promediador Cesva SC-310. Instrumentación portátil de última generación con análisis espectral continuo y con módulos para mediciones de nivel de evaluación en las inspecciones, según normativa vigente (impulsos, tonos puros, baja frecuencia).



Calibrador sonoro B&K 4231. Instrumentación de referencia para comprobación del correcto funcionamiento de los equipos de medición



Termohigroanemómetro. Instrumentación complementaria utilizada para medición de parámetros meteorológicos en las inspecciones acústicas



Estación de monitorado B&K 3597. Analizador estadístico. Instrumentación compacta para mediciones en continuo de ruido ambiental, con registro automático audible de eventos además de los parámetros estadísticos utilizados en acústica y software de comunicaciones integrado



Estación de monitorado B&K 3639. Analizador estadístico. Instrumentación compacta de última generación para mediciones en continuo de ruido ambiental de características similares al equipo anterior con mejoras en almacenamiento de datos, comunicaciones e instalación



Fuente de ruido direccional B&K 4224. Fuente generadora de ruido uniforme utilizada en mediciones de aislamiento, especialmente adecuada para fachadas



Fuente de ruido omnidireccional B&K 4292. Fuente generadora de ruido uniforme con ecualizador multibandas utilizada en mediciones de aislamiento



Montaje de equipo de medida de ensayos de aislamiento de paramentos constructivos en el interior de la edificación. El ensayo consta de medición de niveles de emisión y de recepción, nivel de fondo y tiempo de reverberación



Máquina de impactos B&K 3207. Fuente normalizada generadora de ruido de impactos empleada en los ensayos de aislamiento a ruido de impacto



Analizador de espectros y acelerómetros de B&K para medición de vibraciones en edificios



Calibrador de acelerómetro B&K 4294. Instrumentación de referencia para comprobación del correcto funcionamiento del equipo de medición de vibraciones



Sound Ear B&K VU 2509. Medidor de niveles sonoros en el interior. Sistema óptico graduable que constituye una herramienta ampliamente utilizada en educación ambiental

Además, muy importante, cuenta con una flota de vehículos que además de facilitar los trabajos de campo permite realizar mediciones puntuales que complementan aquellas que se realizan constantemente dentro de la Red fija de Vigilancia instaurada por el Ayuntamiento en diversos puntos de la Ciudad.




Importante es la existencia de un laboratorio móvil que nos permite resolver en tiempo real soluciones y conocer la situación acústica en momentos puntuales así como nos permite también realizar campañas de concienciación ciudadanas en muchos puntos de la ciudad.

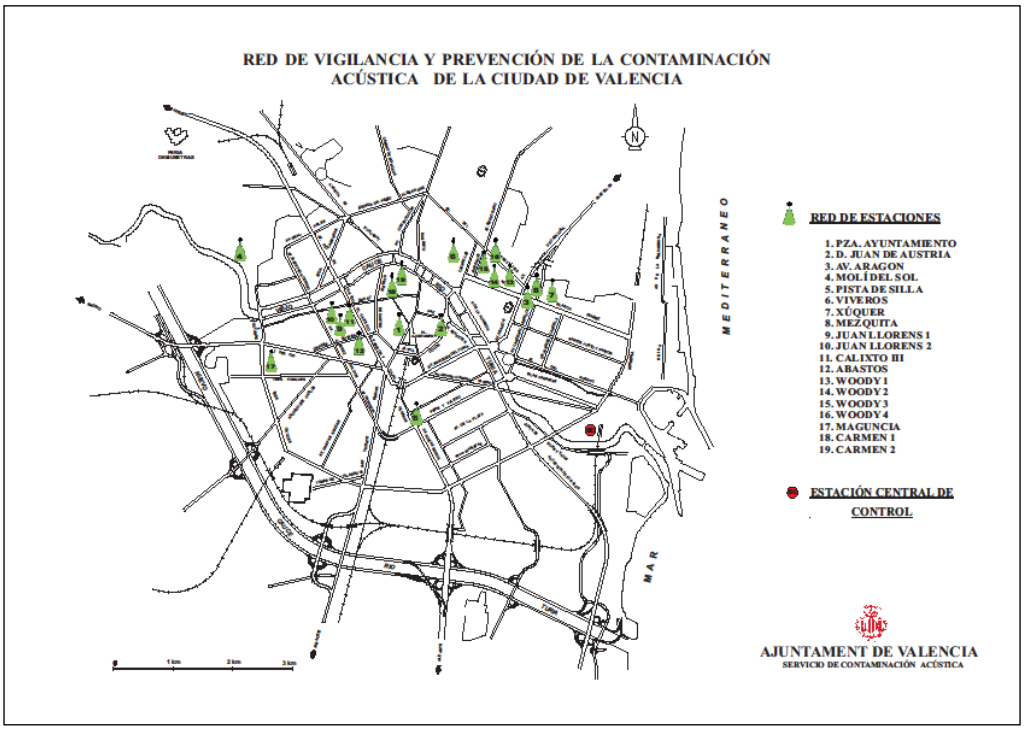



### 1.2 RED DE VIGILANCIA Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

Para un mayor control de la contaminación acústica y para un seguimiento más exhaustivo Valencia diseño una Red de Vigilancia y Prevención de la contaminación acústica.

Los datos que obtienen las estaciones fijas se conocen en tiempo real y son tratadas por los técnicos municipales lo cual nos permite conocer en cada momento cual es el estado acústico de la ciudad y facilita la labor de toma de decisiones y adopción de medidas.

Estos medidores fijos se encuentran situados en puntos estratégicos y especialmente en zonas acústicamente saturadas lo cual facilita un seguimiento continuo de estas zonas más sensibles.




Situación de las estaciones de medición de la Red de Vigilancia de la Contaminación Acústica de Valencia

En conclusión, el conjunto de estaciones de esta Red, proporcionan datos de los distintos parámetros acústicos a pequeños intervalos, proporcionando así miles de registros que son almacenados y tratados con diferentes herramientas informáticas por los técnicos del Servicio, proporcionando una valiosísima información permanentemente actualizada.

### 1.3 VISOR Y MAPA DE RUIDO DEL TÉRMINO MUNICIPAL DE VALENCIA

Toda la información relativa al Plan Acústico Municipal (Mapa del Ruido y Plan de Acción contra la Contaminación Acústica) se encuentra disponible en la Web del Servicio de Contaminación Acústica y Analisis Medioambiental.

Además de dicha información el Ayuntamiento de Valencia dispone del *"Visor del Ruido"* herramienta única a nivel nacional y que mediante la integración de los mapas de ruido en el GIS MUNICIPAL permite un analisis de zonas del mapa de una manera más agil y facilita su comprensión. Es por tanto un gran valor añadido a los modelos clasicos de MAPAS DE RUIDO.

El objetivo de este visor es ofrecer al ciudadano una información más precisa sobre los niveles de ruido en la ciudad de Valencia. Para ello, sobre el callejero informatizado de la ciudad podemos observar diferentes capas con niveles de ruido en distintos horarios y provocados por distintas fuentes sonoras, para que el ciudadano pueda escoger el ruido del que desea obtener datos en cualquier momento.

Para averiguar esto simplemente se debe buscar en el mapa la zona sobre la que se desea consultar y seleccionar el dato exacto del que solicita información y aparecerán distinguidas por determinados colores las zonas del mapa afectadas por éste. Aquí se tiene una visión general del sitio web, dividido en tres zonas principales, *barra de herramientas*, *zona de información* y *zona de capas, búsquedas y resultados*:




**ZONA DE CAPAS, BUSCAR Y RESULTADOS**

En esta parte de la web se encuentran tres funciones distintas, las capas que se pueden mostrar en la ventana de mapa, la función de búsquedas de una zona determinada, y la parte de resultados que es donde se muestran los resultados de las búsquedas que se realizan. A continuación se analizan la zona de capas, con todas sus características.

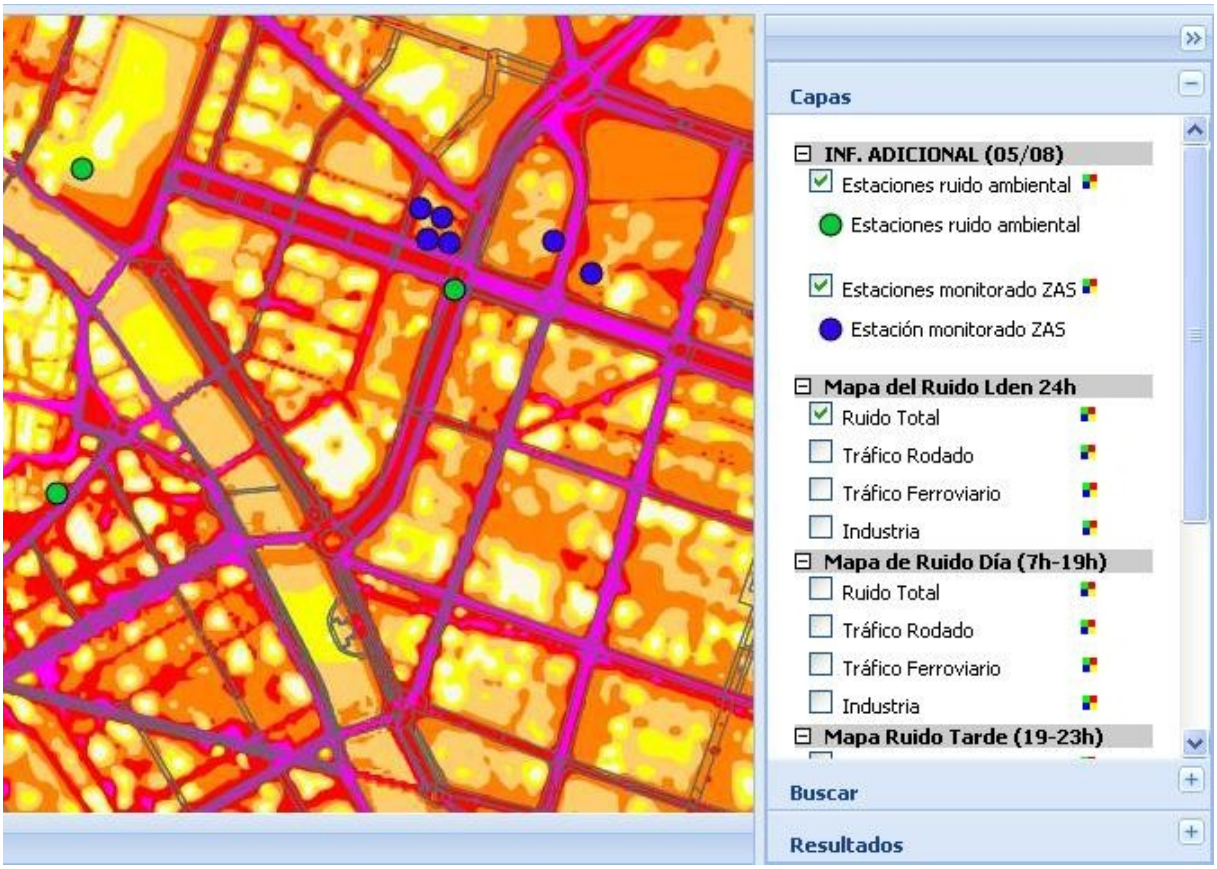
Para obtener información de la utilización de la zona de búsquedas y la zona de resultados se accederá desde los botones en la zona superior de esta página donde pone *'Buscar'* y *'Resultados'* .

## ZONA DE CAPAS

La zona de capas está organizada en cinco grupos claramente diferenciados:

- **Info adicional:** muestra las estaciones de ruido.
- **Mapa de ruido Lden :** muestra el índice de ruido día-tarde-noche.
- **Mapa de ruido Día:** muestra el índice de ruido de día.
- **Mapa de ruido Tarde:** muestra el índice de ruido por la tarde.
- **Mapa de ruido Noche:** muestra el índice de ruido por la noche.

A continuación se muestran algunas imágenes de diferentes combinaciones de capas:

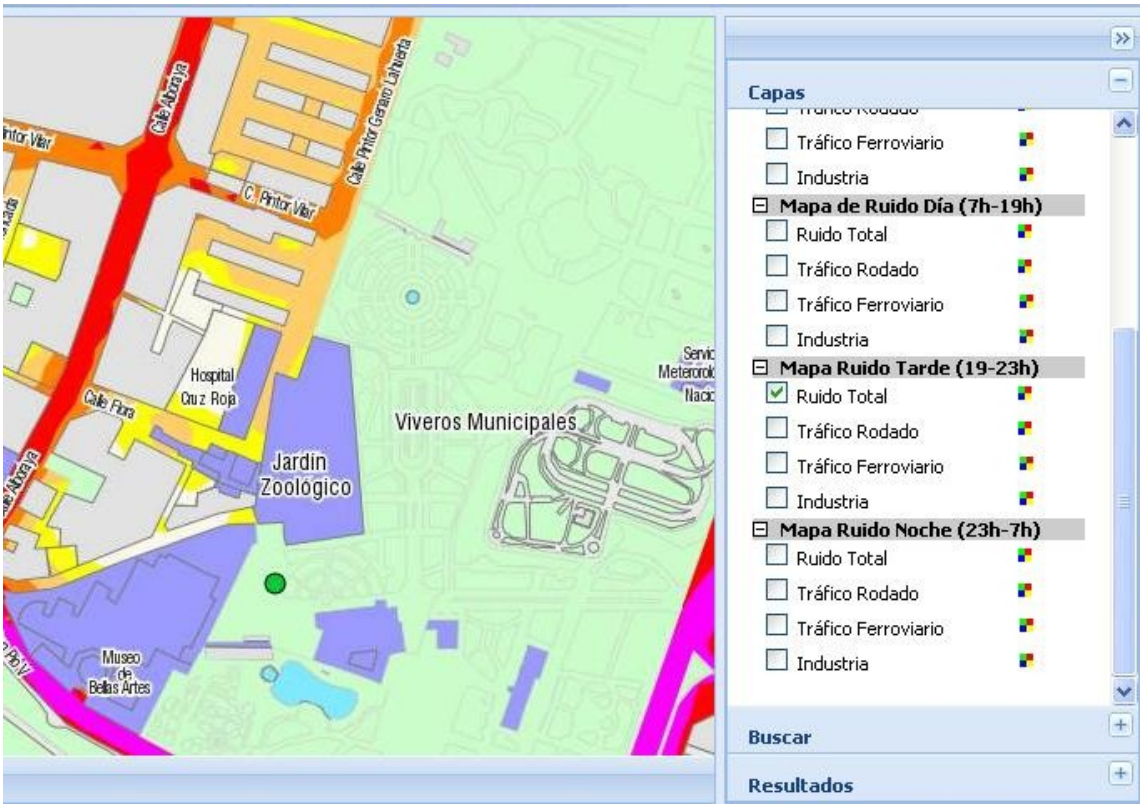



Además en la ventana de mapa aparecerá un tooltip al situar el cursor sobre alguna de las estaciones de ruido. Ese tooltip será diferente dependiendo del tipo de estación, y concretamente en las estaciones de Ruido Medioambiental se tendrá acceso mediante un enlace al informe mensual de ruido de la estación.

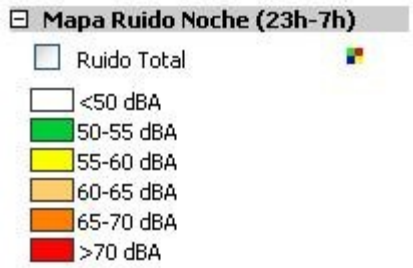



AJUNTAMENT DE VALENCIA

| SPL (dBA) | ARAGON | AYUNTAMIENTO | D. JUAN AUSTRIA | MOLÍ DEL SOL | P.SILLA | VIVEROS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 01-05-10 | 67 | 65 | | 61 | 60 | 56 |
| 02-05-10 | 66 | 65 | | 60 | 59 | 55 |
| 03-05-10 | 70 | 65 | 62 | 64 | 63 | 58 |
| 04-05-10 | 66 | 63 | 65 | 67 | 58 | 57 |
| 05-05-10 | 67 | 64 | 65 | 60 | 59 | 54 |
| 06-05-10 | 67 | 64 | 66 | 60 | 59 | 54 |
| 07-05-10 | 68 | 65 | 65 | 60 | 61 | 56 |
| 08-05-10 | 67 | 65 | 65 | 62 | 62 | 56 |
| 09-05-10 | 67 | 66 | 63 | 61 | 60 | 56 |
| 10-05-10 | 66 | 64 | 65 | 61 | 60 | 56 |
| 11-05-10 | 66 | 64 | 65 | 60 | 60 | 56 |
| 12-05-10 | 66 | 64 | 66 | 63 | 61 | 57 |
| 13-05-10 | 67 | 64 | 65 | 62 | 59 | 56 |
| 14-05-10 | 68 | 65 | 65 | 59 | 59 | 55 |
| 15-05-10 | 67 | 65 | 66 | 62 | 58 | 56 |
| 16-05-10 | 67 | 64 | 63 | 60 | 58 | 55 |
| 17-05-10 | 66 | 64 | 65 | 60 | 59 | 55 |
| 18-05-10 | 66 | 64 | 65 | 60 | 60 | 55 |
| 19-05-10 | 66 | 64 | 65 | 60 | 60 | 55 |
| 20-05-10 | 67 | 62 | 66 | 60 | 60 | 55 |
| 21-05-10 | 67 | 65 | 66 | 61 | 60 | 55 |
| 22-05-10 | 67 | 65 | 65 | 60 | 60 | 55 |
| 23-05-10 | 66 | 64 | 62 | 60 | 59 | 54 |
| 24-05-10 | 66 | 64 | 65 | 61 | 60 | 55 |
| 25-05-10 | 66 | 64 | 65 | 61 | 60 | 55 |
| 26-05-10 | 66 | 65 | 65 | 60 | 59 | 56 |
| 27-05-10 | 68 | 65 | 65 | 61 | 61 | 57 |
| 28-05-10 | 70 | 65 | 66 | 61 | 62 | 53 |
| 29-05-10 | 67 | 65 | 65 | 61 | 60 | 54 |
| 30-05-10 | 66 | 65 | 62 | 60 | 59 | 54 |
| 31-05-10 | 67 | 64 | 64 | 61 | 58 | |
| Dias con datos | 31 | 31 | 29 | 31 | 31 | 30 |
| Promedio | 67 | 64 | 65 | 61 | 60 | 55 |




Junto a la mayoría de nombres de capas aparece un dibujo con unos colores. (  ). Al pulsar en este dibujo, aparece la leyenda de los datos que se escojan, la cual proporciona toda la información necesaria para averiguar que significa cada símbolo de los que aparecen en el mapa. Veamos un ejemplo de la leyenda del ruido total del Mapa Ruido Noche:



### 1.4 PLANES DE ACCION

Los Planes de Acción se trata de un documento de gestión fundamental junto con el Mapa y Visor del Ruido ya que se trata de un documento dinámico que recoge las medidas preventivas y correctivas a adoptar contra la contaminación acústica, con un periodo de vigencia de 5 años.

Valencia en el 2010 elaboró un Plan de Acción al que, tras 5 años de vigencia, ha dado cumplimiento y ha servido de guía y guión para la ejecución de medidas que han permitido una disminuación de la contaminación acústica.

En estos momentos Valencia prepara un documento de balance de este Plan en el que se pondrá de manifiesto el grado de cumplimiento y la repercusión de las medidas en un reducción de los niveles de contaminación acústica.

### 1.5 ORGANO GESTOR DE CONTAMINACION ACUSTICA

Para una mayor coordinación entre servicios del Ayuntamiento que gestionan directa o indirectamente materias relacionadas con la contaminación acústica se creó un **Órgano Gestor de Contaminación Acústica**, cuya misión es la elaboración de las directrices generales de los planes, el desarrollo y la ejecución del proyecto, así como la difusión y el seguimiento de los mismos.

## 2. HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS

### 2.1 SEDE ELECTRONICA

Valencia es el primer Ayuntamiento en la implementación de una sede electrónica que permite una administración 100% sin papeles.
Esto es ya una realidad dentro del Ayuntamiento de Valencia lo cual agiliza los trámites enormemente y permite una gestión de quejas y denuncias con una eficacia y eficiencia dando cumplimiento a la normativa relativa a la Administración Electrónica.

### 2.2 DATOS ABIERTOS

Pretende poner a disposición de los ciudadanos, empresas y emprendedores en formatos digitales, estandarizados y abiertos todos aquellos datos públicos, en bruto (sin procesar), que disponga la corporación para favorecer la transparencia y la reutilización. En una primera fase se ha comenzado con los datos georreferenciados que existen en nuestros servidores y que actualmente ya se están mostrando al ciudadano a través de los distintos servicios de mapas que tenemos publicados en la web municipal

### 2.3 APP VALENCIA

Es una aplicación para dispositivos móviles que permite la comunicación directa del Ayuntamiento hacia el ciudadano:

- **TRÁFICO** recibir avisos de cortes de calle, tráfico denso,...
- servicios de la **WEB MUNICIPAL** Noticias, Agenda de la Ciudad, Perfil de Contratante y Campañas municipales

- **Mapas municipales** interactivos sobre medios de transporte público EMT, Valenbisi, Metro, Taxis, callejero municipal, estado del tráfico, fallas, intensidad del tráfico

- **Realidad aumentada** Consiste en un conjunto de dispositivos que añaden información virtual a la información física ya existente en equipamientos municipales, transporte público, fallas, edificios y lugares de interés cerca de mi

- **Trámites y gestiones** acceso a la Sede Electrónica

- **Servicios cercano**

- **Notificaciones GP**

- **Incidencias en Vía Pública**

- **Lanzadera de aplicaciones publicadas por el Ayuntamiento**

## 2.4 PLATAFORMA TECNOLOGICA SMART CITY. INDICADORES

Solución tecnológica de gestión integral a través de la plataforma Smart City. Diseñado por Telefónica, el proyecto convertirá a la ciudad en la "única" localidad española en aglutinar todos sus servicios a través de 350 indicadores en una plataforma capaz de gestionar el 100% de los recursos públicos e interconectar las herramientas de todas las áreas: movilidad, tecnología, alumbrado, eficiencia energética, medioambiente, gestión demográfica y urbanismo, entre otras.

**Objetivos**

Reducción del gasto público, optimizar la eficiencia en su gestión y mejorar la calidad de los servicios. El Ayuntamiento conocerá en tiempo real lo que ocurre en la ciudad ofreciendo al ciudadano una información puntual que le permitirá trabajar con indicadores de calidad.

## 2.5 WEB MUNICIPAL

En esta web se pone a disposición de la ciudadanía el conjunto de información que se genera en el Servicio y le da visibilidad.




## 2.6 ESTACION CENTRAL DE CONTROL

En las instalaciones del Servicio sito en la Avenida de Francia,60 se encuentra la *Estación Central de Control de la Contaminación Atmosférica y Acústica* desde donde se lleva el control activo de la contaminación atmosférica y acústica.

*La* Estación central de Control consta de varios puestos de trabajo con ordenadores dedicados donde se reciben durante el día los datos registrados en las distintas estaciones. Dichos datos son almacenados y tratados por el personal Técnico del Servicio, elaborando periodicamente informes de seguimiento.

Por otro lado La Estación Central de Control monitoriza en tiempo real en el panel sinoptico dichos datos, permitiendo un seguimiento continuo de la evolución de los contaminates pudiendo detectar al instante posibles variaciones puntuales fuera de rango.




Estación Central de Control del Ayuntamiento de Valencia

## 2.7 APLICACIÓN INFORMATICA PREDICTOR

Predictor 7810 de Brüel & Kjaer programa de predicción y mapas de ruido, para la realización de modelos de ruido en exteriores.

- Permite la modelización de situaciones complejas: puentes, voladizos, barreras con inclinación, barreras sobre puentes, trasmisión de ruido interior/exterior, fuentes sonoras superficiales en vertical, horizontal o sobre azotea.

- Herramientas avanzadas de modelización, como:
  - Referencia a vértices para dibujar sobre imagen de fondo
  - Repetición automática de la última acción y propiedades del objeto creado en el dibujo.
  - Uso de macros para realizar acciones repetitivas de post-procesado de geometría sobre los objetos del modelo, para facilitar y acelerar la depuración de los datos de entrada
  - Opciones de importación de datos y de visualización: se pueden mezclar en el mismo fondo del modelo imágenes .jpg, .bmp, .gif, .tiff, archivos .dxf, .dwg, .shp, .mif … Visualice además los archivos .shp de manera temática, por colores, según el campo de datos que desee.
  - Exportación a Google Earth, SHP y MapInfo con herramientas de georreferenciación directa
  - Gestión multi-modelo en un mismo proyecto: lo que le permite visualizar y compartir en una misma pantalla varios modelos abiertos. Desde la ventana de proyecto es muy sencillo gestionar las diferentes versiones, modificaciones y copias que realice sobre los modelos.

## 3. ACTUACIONES INTELIGENTES QUE MEJORAN LA CALIDAD ACUSTICA

El Ayuntamiento de Valencia ha desarrollado, y está desarrollando en los últimos años diversas acciones y estrategias, en definitiva la adopción de medidas tendentes a la reducción de la contaminación acústica que se traducen básicamente, sin ánimo exhaustivo, en las siguientes:

- Elaboración de un plan integral de movilidad urbana en el municipio de Valencia.
- Incremento de los controles sobre emisiones sonoras de vehículos y motocicletas.
- Promoción del uso de vehículos con motores eléctricos e híbridos.
- Fomento de la mejora acústica de pavimentos.
- Reducción de la velocidad de circulación.
- Control de la velocidad de circulación.
- Mejoras en la urbanización de calles y barrios.
- Restricción del tráfico rodado en el centro histórico.
- Mejora de la información del estado de la circulación.
- Impulso del transporte público.
- Elaboración de un plan director de bicicletas.
- Fomento de los desplazamientos en bicicleta.
- Desarrollo de un registro municipal de bicicletas.
- Control de emisiones sonoras de vehículos municipales.
- Control y gestión de aparcamientos.
- Fomento del uso de neumáticos silenciosos.
- Reducción del ruido de las grandes infraestructuras viarias.
- Reducción del impacto acústico originado por el ferrocarril.
- Reducción del impacto acústico originado por las actividades portuarias.
- Reducción del impacto acústico originado por el tráfico aéreo
- Control de actividades industriales, comerciales y de servicio.
- Mejora acústica en los sistemas de recogida de residuos.
- Control del ruido de las tareas de limpieza y de recogida de residuos.
- Control de ruido de las tareas de jardinería
- Definición y gestión de ZAS (Zonas Acústicamente Saturadas).
- Limitación de actividades en zonas de uso residencial.
- Elaboración de un plan para zonas de ocio nocturno.
- Control de actividades mediante limitadores de potencia sonora.
- Control y gestión de festejos y celebraciones en la vía pública.
- Control de la emisión sonora de obras y maquinaria.
- Instalación de pantallas acústicas.
- Protección acústica de los colegios mediante pantallas acústicas.
- Insonorización de túneles.
- Consideración de la variable acústica en los nuevos planeamientos urbanísticos.
- Control de licencias urbanísticas.
- Formación y sensibilización enfocada al ámbito profesional.
- Formación y sensibilización ciudadana.
- Concurso de ideas para la lucha contra el ruido.
- Creación de un grupo de agentes especializados en materia ambiental “Patrulla Verde”

## 4. CONCLUSIONES

Valencia en el desarrollo de las herramientas e iniciativas expuestas con anterioridad ha puesta en marcha una gestión integral en materia de contaminación acústica.

El planteamiento transversal de la materia y el abordarlo desde distintos departamentos que sectorialmente tienen directa o indirectamente relación con el control de la calidad del ruido, ha permitido afirmar que Valencia desarrolla una gestión inteligente. Todo ello unido al empleo de tecnología y a la puesta en marcha de instrumentos de gestión que mejoran tanto la calidad del servicio ofrecido, como la información y participación del ciudadano la hacen poseedora de las cualidades de una verdadera CIUDAD INTELIGENTE.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# FRAMEWORK TO MONITOR SOUND EVENTS IN THE CITY SUPPORTED BY THE FIWARE PLATFORM

*Joel Preto Paulo[1,2,4], Pedro Fazenda[1,3,4], Tiago Oliveira[1,3,4], Carlos Carvalho[1,4], Miguel Félix[3]*

[1]Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL, Lisboa, Portugal,
jpaulo@deetc.isel.ipl.pt
pedro.fazenda@etconcept.com
tiago.oliveira@etconcept.com
cfc@cedet.isel.ipl.pt
miguel.felix@fi-sonic.com
[2]CAPS - Instituto Superior Técnico, TULisbon, Lisboa, Portugal,
[3]ETConcept Engenharia de Sistemas, Lda., Loures, Portugal,
[4]CEDET – ISEL, Lisboa, Portugal,

**Abstract**
Acoustic maps represent an essential element of acoustic expertise and acoustic studies, which involve: planning of urban areas, spatial development plans, vehicle speed limits, rational management of noise emissions, etc. The emerging Internet-of-Things applied to Smart Cities concept can be utilized effectively for managing urban environments since it offers ubiquitous sensing and actuation. The acoustic sensors network is a mean of delivering in real time specific sound features capable of determining the location of sound sources for security and surveillance purposes or just giving tools and mechanisms for control the road traffic in order to maintain the maximum noise allowed in urban areas. The FI-sonic project consists of developing the necessary low-cost technology to capture sound, using both pressure microphones and accelerometers devices, to integrate existing frameworks in city environments. The project also includes processing this information with intelligent audio analytics, useful to update noise maps and identify and localize a set of different sound events. Localizing sound sources is of vital importance, and applications range from localizing sniper fire in urban scenarios and people in-distress. All this information is used to create quasi-real-time dynamic noise and event maps. The EU is endorsing a set of tools for the IT called FIWARE. The adoption of FIWARE technologies by several stakeholders, such as cites, security forces, will facilitate the integration of FI-Sonic products with the available IT infrastructures.

**Keywords: Noise maps**, **Sound analytics**, **Internet-of-Things, sound source localization and event identification, FIWARE platform**.

## 1 Introduction

Exposure of populations to excessive and long-term noise levels is known as having a negative impact on the quality of life of citizens. The European Union issued a directive (2002/49/EC), transposed to Portugal law by the DL 146/2006, to establish a method for dealing with environmental noise, called the Environmental Noise Directive, END. This

directive states that the major city councils and road, rail, and aviation management offices need to construct noise maps periodically and should make available information about environmental noise and noise planning actions to the public. These maps must describe the likely environmental noise levels: (i) in cities with more than 100,000 inhabitants and 2500/km2, (ii) near all major roads with more than 3 million vehicle passages per year, (iii) major railways with more than 30,000 train passages per year and (iv) airports with more than 50,000 take-off and landing movements per year. In fact, the END only applies to the environmental noise, in particular in built-up areas, in public parks or other quiet areas in an agglomeration, in quiet areas in open country, near schools, hospitals and other noise sensitive buildings and areas.

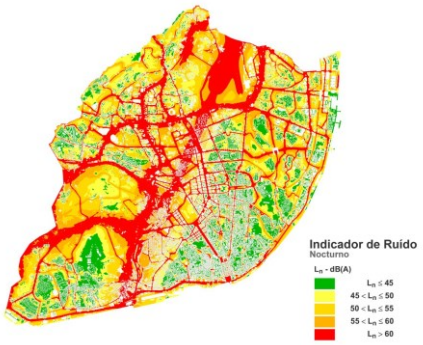



Figure1: Strategic noise map of Lisbon city for the night period, given by the Ln level.

Member states are obligated to develop strategies to improve the city environmental noise management. These strategies will create the necessity of continuous ambient noise monitoring and will have an impact on the corrective measures implemented by municipalities.

Nevertheless, the noise perspective not considered that is caused by: (a) the exposed person himself/herself, (b) noise from domestic activities, (c) noise created by neighbors, (d) noise at work places or noise inside means of transport, (e) due to military activities in military zones, etc..

The directive says that the public should be made aware of any noise assessment data, be consulted during the drafting of action plans and informed of any decisions taken.

Noise maps provide an insight into how environmental noise may be generated from a particular sound source such as traffic or rail transport. This information is not intended to be a precise calculation of the total noise exposure at any given point.

Community noise complaints are dealt with in a different way than environmental noise. Dealing with environmental noise involves looking at long term sources like roads and rail lines and needs longer term planning to manage the effects.

Municipalities should adopt a number of new policies to help manage environmental noise exposure throughout the city. This approach includes measurement of ambient sound quality to learn more about what citizens experience, plans for reducing noise exposure and ways of making all this information available to the public.

The most effective approach to manage noise involves building up a complete picture of the type of noise that is present in the community. This means learning about the levels, patterns and sources of noise so that a more effective plan can be made to reduce exposure. The best way to do this is by measuring the sound levels over a long period of time at places of interest implementing a network of environmental sound level monitors placed in locations that are of value to the community or give a good indication of sound levels from major noise sources.

Sound information acquired from the monitoring network can be used to generate plans for reducing noise exposure and for making better environmental policy decisions.

By other hand, noise is a community issue and the more useful information that is provided to the community, the more effective each citizen can be at helping to protect the environmental quality of their surroundings by helping to develop and then helping to implement better noise management policy. Thus, making available the information about environmental noise and planning to the general public using channels and media are both suitable and effective.

These initiatives are most effective when the information is shared with the community in a way that is accessible and easy to understand. Therefore, an Information Platform (website) is created to show all the sound level measurements and analysis gathered by the monitoring network, along with some useful information that is taken from the sound measurements. In short, these statements raise the awareness in the municipalities to the necessity of noise monitoring in the city environment.

Often, the council police forces face the problem of lack of information about community noise issues and exact location of noisy sources and there is the interest by the private security companies on the detection of trespassing of restricted areas due to the related installation and maintenance costs.

A problem that is presented to the police authorities relates to the night surveillance in bars and discos areas during and after the closure of these leisure places. For this reason, and to minimize complaints from neighborhood residents, the security features perform frequent rounds with these facilities, allocating human and material resources, which results in high costs for the public budget. Thus, a system with these features, by providing continuous information on the sound in those areas, can be an asset as it would save money to law enforcement agencies and security.

Frequently, there is a need for perimeter control to restricted areas, such as inside buildings or in outdoor open spaces. This supervision is usually performed by private security companies. Although there are many security systems used in this context (CCTV systems, microwave, infrared, etc.), the sound in FI-Sonic concept is not used. In fact, the system proposed here uses sound to extract relevant information about what is occurring *in situ*, identify types of events and its location.

Therefore, in the environmental context, there is a growing need to perform continuous acoustic measurements in the cities in order to help the authorities dealing with noise problems in deciding on the best mitigation and containment of environmental noise and community and involve populations in noise pollution issues.

Despite the fact of similar products are available on the market, they are much more expensive. In fact, in order to cover a broader area with accurate results, hundreds or even thousands of microphones should be placed in the urban area. Thus, the cost must be reduced for each unit.

# 2 Description

FI-Sonic is a network of sound acquisition nodes/stations, distributed geographically to cover a wide area in the city or private property. The system comprises several physical and logical modules for sound capturing and processing, and interconnectivity with the FIWARE platform. The FIWARE is an open initiative aiming to create a sustainable ecosystem to grasp the opportunities that will emerge with the new wave of digitalization caused by the integration of recent internet technologies. A multichannel microphone is the center piece of

the acquisition system. Therefore, sound waves propagation direction can be estimated more easily and sound events detected, located and identified more accurately in the 3D sound field, as shown in Figure 2. The main goal of this project is to build a scalable and upgradable low-cost monitoring system to analyze the city sound environment in order to identify and detect events based on sound, like gun firing and people in distress, or to assist municipalities departments of environment on the decision process of action plans to improve the quality of life of the populations. We also intend to provide advanced analytics taking advantage of FIWARE platform on a subscription basis.

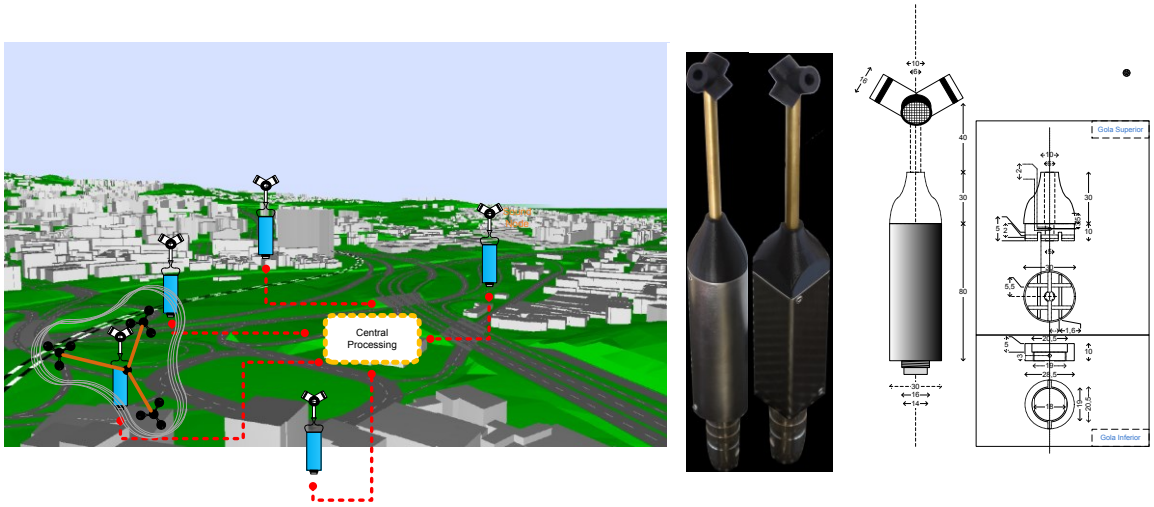



Figure2: FI-Sonic project design overview.

FI-Sonic is a low cost system and uses innovative techniques applied to event detection, localization and identification of sound sources in the city. By using recent hardware platforms and because all production is almost made by ETConcept startup the system cost is largely reduced. Our value proposition is: Dynamic sound and event maps, with event report; State-of-the-art audio analytics and data visualization; Remote configuration and calibration; scalability to include additional sensors types.

The FI-Sonic project has a Business to Business (B2B) perspective. The main market we are addressing is the European municipalities referred in the Environmental Noise Directive (2002/49/EC). According to our research at least 445 cities in 16 countries are covered by the Directive. Nevertheless, the Americas is also a promised market, Mexico, Brazil, Chile, Canada and US joint to the FIWARE platform already. With increasing implementation of sound monitoring systems and the sharing of experiences between municipalities, the awareness about the importance of the sound quality in cities will cause an increase on the necessity of such a system even for the municipalities that are not obliged by European Union directive. European governments with focus on their public safety forces and civil protection are also a potential market for our solution taking advantage of our sound event localization and identification. Multinational private security companies with engineering services to provide access and perimeter control are also a market we are considering. We identify as key customers Portuguese municipalities of major metropolitan areas in order to attest the advantage of our solution and create showcases to support the internationalization to other countries.

The FIWARE platform complements the FI-Sonic project by providing a cost-effective, mainly open source, and community supported set of tools and resources that are valuable for FI-Sonic to deliver and monetize the services associated with audio information by the network of Sound Acquisition Modules.

The adoption of FIWARE technologies by several stakeholders (cites, security forces, etc.) will facilitate the integration of FI-Sonic products with available IT infrastructures [1]. A

possible methodology consists of using the Kurento WebRTC media server to group and process the audio content delivered by the different distributed FI-Sonic audio acquisition modules. WebRTC is an open source technology that enables web browsers with Real-Time Communications (RTC) capabilities via JavaScript APIs. It has been conceived as a peer-to-peer technology where browsers can directly communicate without the mediation of any kind of infrastructure. This model is enough for creating basic applications but features such as group communications, media stream recording, media broadcasting or media transcoding are difficult to implement on top of it. Each module acts like a WebRTC client with live audio streaming of each channel. However, this approach is very dependent of the available network bandwidth. Therefore, at this stage of the project, we focused our work on developing each sound capture module with capabilities of performing all the necessary computations locally. However, we are aware that this approach can compromise its performance and more simplified algorithms, less time consuming, should be used in order to keep it in a predefined level. Thus, some heavy computing signal processing algorithms should be simplified or less treads could be running simultaneously. The module connects to the Orion Context Broker and produces continuous context updates with relevant audio information. These updates are then consumed by users that use this information to build/update dynamic noise maps or to collect information from other subsystems such as video surveillance or CCTV systems.

# 3 System Architecture

The architecture of the FI-Sonic sound acquisition module, represented in Figure 3, is composed by a set of microphones, a multichannel acquisition card, the main processing unit, and the network interface.

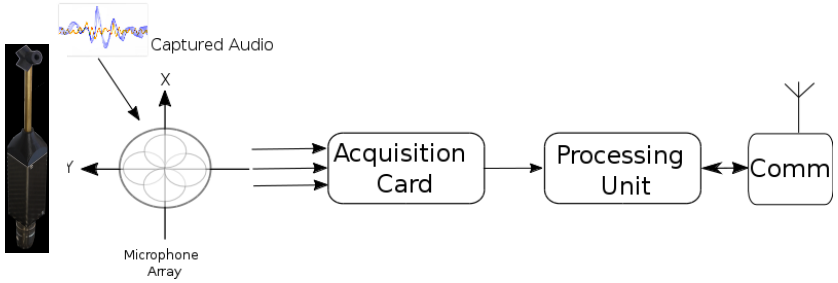



Figure3: FI-Sonic Sound Acquisition Module (Architecture).

### Processing Unit and Operating System

Although the architecture is planned to not have any component tied to a specific vendor or card, we are currently using Edison (from Intel), for the main processing unit. Edison, illustrated in Figure 2, includes two Atom Silvermont cores running at 500MHz and one Intel Quark core at 100MHz. It has 1GB of integrated RAM, and 4 GB eMMC Flash on board, Wi-Fi, Bluetooth and 4 USB controllers. Edison runs Yocto Linux with development support for Eclipse (C, C++, Python).



Figure 4: Intel Edison (Top board), as the main Processing Unit.

### Communications

The financial costs associated with choosing the appropriate processing platform for computation according to processing capacity, RAM, Flash and other features, is marginal in the final price of our product. On the other hand, communications are directly associated with running costs which can scale to unsustainable values when using a network with a significant number of acquisition nodes spread throughout the city. These costs depends on the infrastructure that our clients have access to and subscription contracts to communication services (such as LTE(4G) or Fiber). Costs can be associated with the amount of data traffic, and therefore the communication module must be specifically pondered considering this fact.

Depending on the amount of available bandwidth (we are assuming that bandwidth and amount of transmitted data is limited), we have different firmware solutions. In the most limited scenario we assume that the acquisition module only acquires meta-information about the audio such as sound levels and related measures, such as, max, min, rms, std values, spectrum information (wideband and by frequency bands), onsets, and other features, such as, semantic information that can be transmitted as a single vector to a centralized data base to be used by various maker stakeholders.

### Firmware

Most of our current developments of the FI-Sonic Sound Acquisition Module are currently focused at the low level firmware level. The firmware is being programmed using C++ (for performance in signal processing) with the application running on the Yocto Linux operation system. For the sake of system modularity, audio acquisition uses the Advanced Linux Sound Architecture (ALSA) to be able to support different audio interfaces. We have been working on setting-up the development environment, configuring the operation system, and configuring ALSA to use a custom-built (still under development) acquisition card. Using the ALSA Library API we are acquiring several audio channels connected to the microphone array. Future work includes processing this audio signal for extracting features at a programmed sampling rate, determined depending on network connection limitations.

### FIWARE Platform

The FIWARE Platform complements the FI-Sonic project by providing a cost-effective, mainly open source, set of tools and resources that are valuable for FI-Sonic to deliver and monetize the services associated with audio information by the network of Sound Acquisition Modules. The adoption of FIWARE technologies by several stakeholders (cites, security forces, etc.) will facilitate the integration of FI-Sonic products with available IT infrastructures.

### Sound Bite Processing and Delivery - FIWARE architecture using Orion

We are considering two different design strategies. Considering the most probable scenario where FI-Sonic acquisition modules are deployed with constricted communication capacity, most of the audio processing will be executed locally at the Processing Unit. Audio acquired by the microphones is analyzed and features are extracted for the audio into a vector containing several data element attributes (<name>, <type>, <value>). This vector corresponds to context information that is periodically produced and sent to a Orion Context Broker (CB) Generic Enabler (GE). This audio feature information is then distributed by the CB to different subscribing applications as shown in Figure 5.

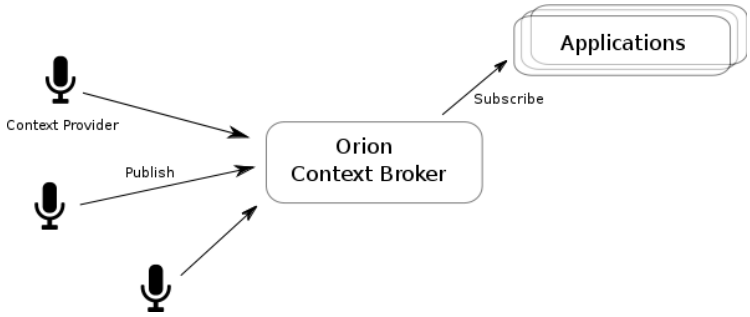



Figure 5: Audio Context Production and Application Subscription via Orion.

This basic architecture allows FI-Sonic to distribute context information according to a predefined sampling rate. This is used to distribute and store important audio features such as the amount of noise at a given location over time.

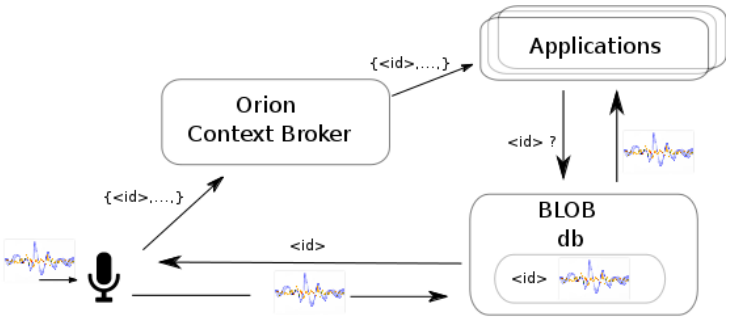



Figure 6: Processing events and saving sound bites to a binary large object (BLOB) storage database.

A refinement of this solution (that requires more bandwidth) includes having triggers that are fire based on features extracted from the audio stream (for example a loud sound). With the occurrence of these events it is important to save the raw audio sound bite and store it using a binary large object (BLOB) storage database (e.g., CRATE, https://crate.io/). Audio blobs are uploaded to the BLOB database and the id of the blob is send as a context element attribute to the CB, as shown in Figure 4.

### Audio Processing Pipeline (FIWARE architecture using Kurento )

Considering a network with less constricted communications, an alternative architecture can be considered for sound acquisition and processing using Kurento. With the advantage of having less expensive (requiring less computational resources for the Processing Unit) audio acquisition modules, most of the computation can be delegated to a centralized computer running the Kurento Media Server. Kurento is a WebRTC media server with advanced media processing capabilities. Its modular architecture makes simple the integration of different media processing algorithms. A chain (media pipeline) of computational blocks (media elements) can be used to process the audio stream as shown in Figure 5.

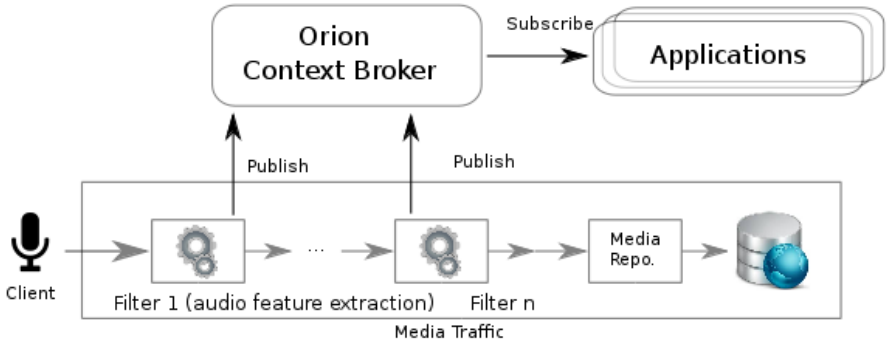



Figure 7: Media Pipeline using Kurento Media Server.

Each computational block extract a set of audio features and updates the corresponding context with the CB. This solution presents a higher level of flexibility because the pipeline can be very easily managed. New blocks can be added/removed and updated at any time as opposed to the configuration where the audio processing is done locally at the acquisition node. The Kurento solution also presents the possibility e of having the entire audio saved on a media repository, which can be useful for future reference (for example analyzing an audio event for some security application).

### WireCloud, mashups and the Data Market

The applications illustrated in Figures 3, 4 and 5 can be tailor made for different stakeholders (security forces, city control center, etc.). Information on acquired audio data can be made available and sold on online markets. Through the WireCloud Mashup Platform we can use audio information (connecting to the CB) to create mashups, take them to the marketplace and sell them on our store reaching a broader audience of consumers. The already available infrastructure WStore GE provides us with the ability to manage our offerings and sales, including the charging of the customer.

### Current Work

Currently, our developments are being focused at a very low (Firmware) level of our Sound Acquisition Module. Future work includes connecting our firmware to the CB, which we have already installed on a server using AWS (amazon web services). We are planning to transition to FI-Lab as it becomes more stable.

## 4 Methodology

The research and development of this system is multidisciplinary and requires its development in several phases. Therefore, the project is split in three phases, essentially. The first phase consists of developing all the necessary hardware and software for the measurement of the noise levels (sound monitoring stations, FIWARE processing, communications). The second concerns about signal processing for location and identification of sound sources (developing algorithms for sound propagation, feature extraction/selection and statistical classification). The last phase is about installing a pilot system for validation the proof of concept.

Although different localization methods could be used in this approach the energy-based localization method is adopted which employs measurement of the sound intensity vector. The first-order ambisonic microphone allows the estimation of the direction of sound source and by using more than one unit an estimate of the exact position of the sound source is possible [2-6]. Accuracy of triangulation depends on the precision of the angle estimation. The estimation of localization of the sound source with the use of the ambisonic microphone is made at first stage in

laboratory conditions for maximal accuracy and for calibration purposes and later in real environment condition at the time of the pilot system validation.

For the identification of sound events responsible for the relevant sound sources at each time a number of types of sounds are considered for the analysis in order to cover most of the situations in urban environments. These types of sounds are people screaming or talking loud, shot guns, animals (dogs, birds, etc.), different types of vehicles noise (light and heavy cars, motorcycles, airplanes, train compositions, etc.), horns and road accidents.

In order to identify sound sources, at this early stage of research, two different types of classifiers are used. The Bayesian classifier corresponds to a quadratic discriminant analysis (QDA) and the Neural Network classifier is a feed-forward network with tan-sigmoid transfer functions for both the hidden layer, which uses 9 neurons, and output layer. An *N*-dimensional density model (where *N* is the length of the feature vector) is then adjusted to each class, based on the training set. One first advantage of using the Neural Networks against Bayesian classifiers is that the assumption of normal distribution for the selected features is not required.

Four distinct feature extraction stages are to be compared to evaluate their relative performance while using the same classifier stage. The main feature sets are: (1) low level signal properties; (2) MFCC; (3) psychoacoustic features including roughness, loudness and sharpness; and (4) an auditory model representation of temporal envelope fluctuations [7-8].

The feature vectors were divided into two sets: a training set and a test set. A randomly chosen subset of 30% of the vectors is assigned to the training set and the remaining 70% correspond to the test set [9-11].

A pilot system, consisting of the measurement of noise levels, localization and identification of sound sources, will be installed in situ to allow the validation of the all concept.

# 5 Conclusions and FIWARE Recommendations

FIWARE provides FI-Sonic with an appropriate set of APIs useful to deliver audio-related information captured by a network of audio acquisition modules. It is being adopted for the information technology infrastructure in different cities (for Smart Cities), as an open solution to integrate different services from different vendors and providers. It gives FI-Sonic the ability to take its information to market and share it with other stakeholders.

We recommend that extra efforts should exist towards normalizing context messages used with Orion Context Broker for several different recurrent domains (audio, measures from diverse sensors, etc.).

We recommend taking advantage of the extensive work already being done with ontologies for knowledge representation and extend the terminology for messages exchanged with the context broker. See, for instance, the Audio Features Ontology Specification http://motools.sourceforge.net/doc/audio_features.html)

The core concept of FI-Sonic project  is the Sound Acquisition Module interconnected to a network, using the FIWARE platform. Currently, our developments effort is being focused on the Acquisition Module at a very low level (firmware). In the near future the work includes connecting our firmware to the CB, which we have already installed on a server using AWS (amazon web services). The physical part of the module, the hardware, consisting of a set of

microphone capsules and the structure where they are fixed to and the body and the signal conditioning electric circuits (mic pre-amplifiers and power supply) is almost done.

In order to make available the proposed project to the public, a website for the FI-Sonic was created, http://fi-sonic.com/, covering the more relevant topics such as Description, General Overview, Applications and Achieved Results to name a few.

This website serves multiple purposes and can have multiple functions for both us and potential clients and to follow the evolution of the project. In fact, this material works for us as guidelines to structure our ideas in a visual and contextual perspective. For the people outside the project, potential clients and partners, sponsors, investors, etc., certainly, it will be more comfortable in viewing the undergoing of the works. We believe it is a powerful tool to have more realistic feedback from people interested in the project.

Since the project was recently initiated the results are preliminary.

**Acknowledgements**

The FI-Sonic project, research and development, has been supported by Soul-Fi, Startups Optimizing Urban Life with Future Internet, (Soul-fi is a FIWARE accelerator funded by the European Commission, FP7, aiming to grow web-based, innovative solutions (open data and crowd sourced data) for smarter urban life of EU citizens (topics are quality of life, mobility, resource efficiency, tourism)), acting as a facilitator to deliver innovative and promising products to the market.

## References

[1] https://www.fiware.org/

[2] Michael Gerzon. 1975. The design of precisely coincident microphone arrays for stereo and surround sound. 50th Audio Engineering Society Conference, (AES preprint 8083L20)

[3] Dimoulas C., Avdelidis K., Kalliris G. andPapanikolaou G., “Sound Source Localization and B-Format Enhancement Using Sound Field Microphone Sets”, in 122nd AES Convention,Preprint Number: 7091, May 2007

[4] J.H. Wang, C. Chang, “Identification of the number and locations of acoustic sources”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 284, no. 1-2, pp. 393-420, June 2005.

[5] Dimoulas C. A. 1, Kalliris G. M. 2, Avdelidis K. A. 3 and Papanikolaou G. V.. “Improved localization of sound sources using multi-band processing of ambisonic components”. Proc. 126nd AES Convention, Audio Engineering Society, 2009

[6] J. Wierzbicki, P. Malecki and J. Wiciak. “Localization of the Sound Source with the Use of the First-order Ambisconic Microphone” ACTA PHYSICA POLONICA A. Vol. 123. nº6. 2013.

[7] Courtenay Cotton & Dan Ellis, “Spectral vs. Spectro-Temporal Features for Acoustic Event Classification,” submitted to IEEE WASPAA, 2011

[8] Andriy Temko & Climent Nadeu, “Classification of acoustic events using SVM-based clustering schemes,” Pattern Recognition 39(4): 682-694, 2006

[9] Bugalho, M., Portelo, J., Trancoso, I., Pellegrini, T., Abad, A.: Detecting audio events for semantic video search. In: Proc. Interspeech 2009

[10] Alan Dufaux. “Detection and Recognition of Impulsive Sound Signals”. Institute of Microtechnology, University of Neuchatel, Switzerland. PhD thesis 2001

[11] Li, D., Sethi, I. K., Dimitrova, N. and McGee, T. Classification of general audio data for content-based retrieval, Pattern Recognition Letters, 22, 533-544, (2001).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# TERCER ANIVERSARIO (2015) DEL DÍA MUNDIAL DEL SONIDO. UN ANÁLISIS REFLEXIVO SOBRE LA DETECCIÓN DEL SONIDO Y SU USO EN LAS FUTURAS *SMARTS CITIES*

PACS: 43.10.Ce

Maria Luisa Luceño Ramos[1], Francesc Daumal i Domènech[2,] Josep Cerdà Ferre[3], Alicia Giménez Pérez[4], Fausto Rodríguez Manzo[5]
[1]Universidad Autónoma de Madrid, Marisa.Luce@uam.es
[2]Universitat Politècnica de Catalunya, Francesc.Daumal@upc.edu
[3] Universitat de Barcelona, Cerda@ub.edu
[4] Universitat de Valencia, Gimenez@fis.upv.es; [5] Univ. Aut. Metropolitana, Azcapotzalco, Rfme@correo.azc.uam.mx

**ABSTRACT**

Human beings in big cities have a progressive loss of hearing abilities, and it is usually associated in XXI century with an exponential development of sophisticated sound detection and processing technologies, comprising security, work optimization, comfortability and leisure. Letting expert systems to have control on hearing abilities, and kinestesic perceptions by which vibrations are perceived, make us to rethink the role that *Smart Cities* will have to play in the future in a collaborative integration with human beings towards utopias of sound control or distopias of population segregation where a dominant civilization controls sound and the dominated can not. The substitution of lost or non-developed hearing abilities poses interesting challenges from technology and ethics, in a technological development based on the survival of our species and the maximum enjoyment from the environment which we are living in.

Key words: Smart Cities, sounds, sensors, domotics, wearables, robots, cyborgs, Ethics

**RESUMEN**

La pérdida progresiva de habilidades de audición en el ser humano en las grandes ciudades viene aparejada en el s. XXI con un desarrollo exponencial de sofisticadas tecnologías comercializadas de detección y procesamiento del sonido, vinculado a seguridad, optimización del trabajo, confort y ocio. La delegación en sistemas expertos de la función auditiva, y de las percepciones kinestésicas por las cuales se perciben vibraciones, nos hacen repensar el papel que las *Smart Cities* deberán jugar en el futuro en su integración colaborativa con el ser humano hacia utopías del control del sonido o bien distopías de segregación poblacional donde una civilización dominante lo sea por controlar el sonido, y una dominada lo sea por no poder controlarlo. El suplir funciones auditivas perdidas o no desarrolladas en el ser humano plantea interesantes retos desde la tecnología y la ética, en un desarrollo tecnológico fundamentado en la supervivencia de nuestra especie y en el disfrutar al máximo del entorno en el que vive

Palabras clave: *Smart Cities*, sonidos, sensores, domótica, *wearables*, robots, *cyborgs*, ética.

**1.- INTRODUCCIÓN.-**Especialmente en este año, la celebración del Día Mundial del Sonido (DMS) debe cobrar un gran relieve entre los acústicos. Varias son las razones de ello, y las más significativas son las siguientes: 1).-La coincidencia del día (el 22 de octubre) con el jueves 22 de octubre en que estaremos todos los acústicos reunidos en el congreso TECNIACÚSTICA, que se celebrará en la ciudad de Valencia. Por ello, esperamos tener al menos cinco minutos durante la cena de gala para leer un manifiesto y soplar un pastel de Tercer aniversario del DMS, cantando todos juntos "Cumpleaños feliz" .2).-La coincidencia de que esta sede del congreso, sea el de la Universitad Politècnica de Valencia, que junto a la Universitat Politècnica de Catalunya, la Universidad Autónoma de Madrid, la Universitat de Barcelona, y la Universidad Autónoma de México, promocionaron la fundación del DMS. 3).-La coincidencia en que en este congreso nos encontremos juntos casi todos los fundadores. (Cuatro de las cinco entidades).4).-La coincidencia de que curiosamente continuamos queriendo celebrar los sonidos. y 5).-El deseo de celebrarlo este año abordando un tema que a todos nos interesa, vinculado al simposio del día 22.

***2.- SMART CITIES*, LIMITACIONES AUDIBLES EN EL SER HUMANO Y TECNOLOGÍAS DEL SONIDO.-**Las *Smart Cities*, Ciudades Inteligentes, debieran caracterizarse por la optimización de la captación y del procesamiento del sonido en beneficio del ser humano. Todo es sonido en el mundo. Y el ser humano tiene limitaciones. Para la detección de todo tipo de sonidos, el ser humano percibe conscientemente y de modo natural frecuencias mínimas superiores a 16 hertzios (muy superiores en la mayoría de población perdidas debidas a ruido ambiental y a falta de entrenamiento) y máximas alrededor de los 20.000 hertzios (variables por las mismas causas). En cuanto a intensidades mínimas puede moverse en los 4 decibelios en la mayor parte de la población. Tal vez por cuestiones evolutivas, pero seguro por ambientales, hemos perdido frecuencias de sonido. Sería muy interesante poder ampliar nuestra franja de escucha como a las especies animales, para quienes el oído es fuente de información, para poder percibir sonidos de fuente objectual, animal o humana que puedan suponer una amenaza. Por ello se desarrollaron desde la 1ª Guerra Mundial dispositivos para la captación de sonido procedente de largas distancias que pudiesen evidenciar el progresivo acercamiento de efectivos de aviación, de maquinaria militar y de tropas. Y a partir del s. XX se han ido perfeccionando y han surgido otros de transmisión y almacenamiento. Pero el problema de fondo queda sin resolver: no todo es captable. La delegación masiva en este tipo de oídos artificiales y la posibilidad de un sistema experto que gestione la detección de sonidos y activación de alarmas con respuesta de resolución de problemas, daría a la tecnología un poder ejecutivo para descargarnos de tareas repetitivas, difíciles, molestas o que implican ubicuidad de una situación. De ahí la necesidad del desarrollo tecnologías del sonido para la información y comunicación y por tanto, para la supervivencia ¿y dominación?.

Paradójicamente, la pérdida de audibilidad del ser humano se da al tiempo de un desarrollo de cada vez más sofisticados sistemas comercializados de procesamiento del sonido musical para auditorios, y para la reproducción doméstica. La oferta de la tecnología supera ampliamente la valoración real de las cualidades del sonido, y es símbolo de una cultura que paga por cualquier cosa de la que carece. No se garantiza que estos sibaritas del ocio-bienestar tengan íntegras sus capacidades auditivas, pero lo más importante es que no es seguro que valoren siempre el impacto del sonido en todos los órdenes de la vida cotidiana, empezando por la del hogar y extendiéndose fundamentalmente por la urbana. Nadie duda hoy en día de la utilidad de tecnologías como el radar, basadas en ondas de sonido (aviónica, defensa militar), y sería toda una revolución la generalización de la aplicación de dispositivos similares de captura a otras áreas de la vida cotidiana, en una civilización donde prima la imagen, por la aprehensión del dato rápido y puntual frente al lento aprendizaje de habilidades.

**3.- LAS SMART CITIES Y EL SONIDO.- EL QUÉ: ¿QUÉ SON LAS *SMART CITIES*?** El cuándo-ucronía. Cuando hablamos de *Smart Cities*, ciudades inteligentes y/o eficientes, tenemos preconcebidos ciertos conceptos: control de las tecnologías de la información y comunicación por parte de las Administraciones, para mejorar los servicios de la ciudad y/o ampliarlos, como soporte y herramienta que posibilite nuevas prestaciones, implicando a la ciudadanía en situación de corresponsabilidad al ser el principal beneficiario, y todo ello en un contexto de rentabilidad

máxima de los recursos existentes: los ciudadanos en principio generan voluntaria o involuntaria, pero continuamente datos a un sistema que se retroalimenta, procesando esos datos y dando servicios asociados. Se presentan o venden al gran público como tecnologías atractivas, fáciles, disponibles, divertidas a ser posible y baratas o gratuitas, con ubicuidad y sincronía. Y es cierto y tras ello deben estar sustentadas, obviamente por criterios de: usabilidad, resistencia, ergonomía, no obsolescencia y rentabilidad, y favorecer la cohesión social. Pero lo que nos proponemos es un cambio de paradigma y es que en estas *Smart Cities* el papel del sonido como fuente generadora de información, (y no solo datos visuales y alfanuméricos, y de mediciones ambientales de gases, partículas, etc.)[1], que genere igualmente datos procesados de ondas sonoras, con un status similar en cuanto a atención investigadora y posibilidades de aplicación que otro tipo de fuentes[2]. Además, el concepto de *Smart City* como ciudad inteligente debiera englobar otro tipo de agrupaciones urbanas con el mismo impacto operativo: una barriada inteligente, un polígono industrial o un parque industrial inteligente. La utopía de fondo es llegar a obtener una zonificación inteligente (¿por qué no un conteniente o todo el planeta?), para conseguir ciudadanos supervivientes, o más liberados y más cómodos (por qué no, más inteligentes). Se plantean las *Smart Cities* también en términos empresariales de rentabilidad, eficacia, eficiencia, de aprovechamiento de los recursos para obtener el máximo beneficio de las inversiones, poniendo el acento en el sector de proveedores de servicios básicos, y por tanto en participantes más o menos interesados en dicho concepto, cuando el énfasis debiera estar en los ciudadanos, para quienes en principio parece estar dirigido. Naturalmente que la presencia de aquellos agentes no es excluyente, pero centraremos en el hombre, pues ha de ser la medida de todas las cosas. El estado del bienestar nos presentaba hasta el 2007 y un poco más adelante un panorama de lo chic, efectivo, lúdico, asociado a estos ciber-entornos digitales automatizados, donde el caso más popular es la domótica de las casas, de tal manera que toda una ciudad con casas domóticas pareciera una ciudad inteligente, (de por sí no lo es, como si la posesión-uso de un teléfono móvil inteligente parecería incrementar nuestro coeficiente intelectual, o el uso de un navegador para el coche nos convirtiera en un taxista innato). No hay más que abrir las páginas de los periódicos para ver la cantidad de desastres que hay a nivel mundial, situaciones límite, donde la especie humana se pone al borde mismo del abismo, y donde el sonido, de haberse capturado, procesado, aplicado, y almacenado, etc. mediante algún tipo de tecnología pudiera haber mitigado, paliado ciertas situaciones o zanjado o erradicado el problema.

Pues, ¿para qué necesitamos una tecnología que no soluciona problemas verdaderamente serios? Y si no la hay ¿por qué no crearla? ¿Sólo queremos una tecnología de lo rentable y según para quienes? Pero si al final lo verdaderamente rentable es esto: lo que termina resolviendo problemas que se despreciaban o en los que nadie reparaba hasta que el desastre no tenía remedio. Y eso trae cuenta, primero para quien lo sufre, y después para las empresas que lo desarrollan, instalan y mantienen. Y para la Administración el ahorro es mucho mayor. Y todo un segmento de mercado para el resto de agentes. Sí, pero tal vez no de un modo tan evidente en las ciudades normales. Escuchar (informarse por) las noticias de la radio o en la TV denota que la tecnología pudiera paliar algo. Siempre hubo espacio para los nenúfares del lago con cisnes, con dispositivos que conservan limpio a aquel y alimentados a estos; tal vez no sepamos que el cisne es de las aves más agresivas. Y que tener un detector de sonido puede ser interesante si queremos evitar que un cisne termine matando a los otros cuatro de su estanque. Y todo por no tener un detector de graznidos. El cisne, a todo esto, tiene un patrón característico.

[1] *Smart Citizen*' es un sensor ciudadano realizado en Barcelona en el Fab Lab del Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC) y el Laboratorio de Interactivos de Hangar. Galardonado con el premio World Smart Cities 2013 por su contribución al concepto de ciudad inteligente, se desarrolló con el open hardware Arduino. El *Smart Citizen Kit* tiene sensores que miden la calidad del aire, la temperatura, el sonido, la humedad y la cantidad de luz. Así el ciudadano conoce la información de primera mano y contribuye a la transformación de la ciudad en un lugar mejor para vivir.

[2] Y hay varios motivos: 1).-el que la civilización actual está basada en información visual, y derivada de ella, en la escritura, con lo cual mucha de la información no llega o bien a analfabetos o a lectores no plenamente funcionales; 2).- valoramos la posibilidad de cierto agotamiento de las fuentes visuales para generar información; 3).- la no todavía suficientemente explorada vía del sonido y 4).-: la necesidad de una constante creatividad o pensamiento divergente, desvinculado de la tradición o a la práctica habitual.

Las metas a corto plazo.- Desarrollar completamente una tecnología lleva tiempo. Con prioridades, la conversión de una ciudad, si no a inteligente, al menos a espabilada, sería suficiente, y es lo que proponemos a través de un cambio de paradigma: tomar como fuente el sonido, que implica grandes saltos al vacío pero no pasa nada, porque siempre hay red. Con la Red que nos envuelve, aprovechando la democratización del recurso del s. XX que tal vez beneficia a mayor número de seres humanos: Internet.

4.- ¿**QUÉ PAPEL DEBIERA JUGAR EN EL FUTURO EL SONIDO EN EL CONTEXTO DE LAS *SMART CITIES* O CIUDADES INTELIGENTES**?. Con la creciente aparición de nuevas necesidades de la vida diaria que demandan nuevas soluciones y vinculadas al sonido, el futuro se vislumbra entre una civilización dominante, que controle el sonido y todo lo que le rodea, y una civilización dominada o a punto de su extinción, habiendo perdido conciencia de la utilidad del sonido y por tanto, la habilidad de procesarlo, la humanidad funcionando a dos velocidades, con dos tecno-etnias diferenciadas por sus cualidades audibles. Naturalmente, mejoraría la supervivencia un SISTEMA INTEGRADO de los recursos en una logística adecuada.

**5.- ¿CON QUÉ TECNOLOGIAS?-** Tecnologías de la escucha y de toma de decisiones y ejecución. Tecnologías de filtrado del paisaje sonoro: A) Audiocámaras en ciudad: cámaras con sistema avanzado de perfección de sonido (zoom acústico) con sensores de distinto tipo que pudieran hacer filtrado de tipos de frecuencias, identificando el tipo y la fuente y la dirección de donde proceden. B): Igual que hay un *Google Maps* de imágenes, ¿qué tal un satélite oidor de desastres a tiempo real que pudiese atender urgencias casi al instante?. La simulación de la inteligencia humana y la delegación en máquinas, con su minería de datos sonoros de fuentes anteriores y otras, volcados en bases relacionales conectadas a sistemas expertos de Inteligencia artificial sería el escenario en el que nos moveríamos. Muchas de las aplicaciones tienen o pueden estar teniendo alguna solución, mejorable, en este sentido, la intención de estas líneas es crear la conciencia de la necesidad de esta tecnología. Otras nos sonarán a ciencia-ficción, no importa. En todo caso es una simple muestra de todo lo necesario, donde la recepción centralizada de sonidos que supongan un peligro para la vida humana proporcionaría rápidamente efectivos que supiesen qué hacer (implicando a diversos profesionales de las Administraciones), y como menos, ahorrasen costes o facilitasen la vida. Los *Mass Media* nos han dado muchas pistas en este 2015:

**6.-El dónde-ENTORNOS DE LAS *SMART CITIES***. *Captar sonidos del entorno* cercano:

**6. 1.- Medio ambiente y ciudad**.- Sistema de alerta de eventos negativos en las proximidades (un socavón, un hundimiento de un puente, de una casa, de un árbol) fuga de agua, de gas, de rompimiento de cristales. La escucha del crepitar del fuego en la ciudad, con llamas que avanzan y/o crecen. Arboles viejos: riesgo de rotura, colapso; tráfico-obras públicas: detección de exceso de tráfico-ruido. Si se apaga toda una fase de luz de la calle o de la carretera (no se percibe el vibrar de las lámparas): saltar aviso para pronto arreglo. Dilataciones anómalas de juntas de autopista: puentes. Seguimiento de desprendimientos de rocas. Que en los semáforos haya sensores de ruido, o en sitios clave de las ciudades recogiendo sonidos que interesan sobre accidentes. Sistema de desconexión de auriculares automática cuando la gente cruza un paso de cebra y conduce en un medio de transporte. Avisos 3 km antes de entrar en un túnel con avería importante a los medios de transporte que circulen para que no cojan ese camino; a su vez, la gente atrapada sin necesidad de llamar, estaría avisada a las autoridades por el sistema experto. Ídem en ascensores. Meteorología para la ciudad: anticipación de los llamados peligros naturales, aproximación de vientos, lluvias, tornados, macro-granizo, cuando la predicción meteorológica no es suficiente. Geología: Percepción lejana de terremotos, tsunamis, y volcanes. Especies animales: detección de especies invasoras en el medio ambiente: enjambres de avispas asiáticas, de mosquitos tigre, etc. Localización tanto de especies peligrosas como de especies en peligro: seguimiento de aves por trinos en según qué punto del paisaje y vigilarlas por zonas según calendario. Ubicación de perros perdidos (u otras mascotas) por sonido específico (reconocimiento por ladrido y traducción de lo que quiere comunicar el animal). Sensores en el terrero de caídas de fruta: puede estar madura antes de temporada, para acelerar la recogida. El ser humano en el ambiente: acompañamiento de población inmigrante desplazándose, a fin de que no sufran innecesariamente en el camino. Localizar personas en espacios cerrados no aptos. Detección de

aglomeraciones inesperadas en la calle. Sensores de palabras/frases-peligro, incluso en lenguas no locales. Ídem en petición de socorro en piscinas o en lugares abiertos que no tienen socorrista o como apoyo al mismo. Detectar el grito de un humano al que se lleven contra su voluntad.

**6. 2.- Industria**.- Dispositivos discriminadores de sonido indicando que significan. Detección de procesos industriales anómalos en factorías (una pieza vital que se suelta: salida automática de la cadena). Desastres de electricidad, gas, agua, industria química, de explosivos, etc). Detectar fugas y dar aviso + rescate a la población mediante megafonía, llamadas a móviles, mensajes, y el personarse in situ. Chips en objetos pequeños importantes para poderlos localizar por voz cuando se pierdan por casa o en entornos industriales sensibles. Que los contenedores de vidrio vayan avisando a la empresa concesionaria que descargue el contenedor (sonido cada vez más agudo). Medios de transporte: barcos de recreo. Lanzamiento por radio de señal de auxilio para ser recogidos aunque sea en una zodiac, tabla de surf, etc. Aviones: transmisión continua en tiempo de vuelo real de los sonidos en cabina de piloto y en cabina de pasajeros. Ese ruidito del coche: pieza que avisa de próxima rotura; dispositivo que detecte direcciones anómalas de un coche en itinerario por carretera u autopista. Sensor que evite que otros coches, kamizakes por error (o no), colisionen con él. Chivato de repostado de fuel inadecuado (sensores en manguera y en boca de depósito). Que el coche avise de que se va saliendo peligrosamente de la calzada, y aviso a autoridades caso de continuidad en conducción peligrosa.

Control de grandes fuentes de energía: electricidad, gas, agua, térmica (producción distribución). Ordenador: sensor que nos dijera claramente que un dispositivo o un programa está fallando y en dónde. Modelización de chirridos, fricciones, deslizamientos inesperados de aviso de avería en multitud de electrodomésticos. Detección de vicios ocultos en edificios e instrumentos musicales antes de comprarlos. Cochecitos de niños: aviso de estar fuera de control del adulto: adulto que no habla puede haber perdido la consciencia: frenado automático. Dispositivos audio amplificadores de ambiente en cascos, porque ¿ciclistas y moteros oyen siempre el trafico bajo el casco?

**6. 3.- Hogar,** entornos de trabajo, entornos lúdicos.- Reconocimiento de voz: entrada a edificios, activador del ordenador, transacciones bancarias por teléfono (hay que mejorar mucho esta tecnología). Modelización de sonoridades humanas en eventos deportivos, lúdicos artísticos: detección de gritos discriminándose emoción, de peligro o delincuencia o violencia. Prevención de butrones y patada a la puerta en cualquier edificio en vacaciones, abandonado, fin de semana, evitando latrocinio y *okupas*. Ese ruidito del hogar: detectar fugas de gas, agua, y que se corten automáticamente y avisen al dueño de la casa. Plagas: detección de nidos, discriminación de especies protegidas para retirarlas conforme a la Ley. Aviso sónico al usuario o mensaje al móvil cuando el frigorífico-congelador carezca de un grupo básico de alimentos como proteínas, frutas, verduras, leche. Prever el colapso de un mueble, o el debilitamiento de vigas por deterioros. Detección de insectos papirófagos y xilófagos en bibliotecas, archivos, etc. antes de que hagan desmanes. Evitar que alguien falsee un examen: detectores de frecuencias en pinganillos en pruebas de universidades u oposiciones. Soledad de los abuelos, personas en riesgo como deprimidos, niños, bebés, captar palabras o ruidos ambiente que alerten.

**6. 4.- Cuerpo humano**. Nanodispositivos. Todo es sonido, muchos procesos biológicos de nuestro cuerpo son sonoros. Nano-robots oyentes que van por el cuerpo, oyendo sonidos que alerten de enfermedades, y ayuden a diagnosticar y a tratar desde fuera. Además de que hagan analíticas y describan curvas de bajada de glóbulos rojos o blancos, p. ej., prevenir mucho antes muchas enfermedades de tal modo que se vaya al médico y se le dé solución con mucha antelación: sensores de sonidos gastrointestinales que avisen de actividad anómala, soplos del corazón, pitidos en los pulmones, crujidos de tendones y articulaciones, especialmente en pacientes diabéticos, casi insensibles. Parches audiosensibles, que enviasen información a un receptor de casa y/o internet a una central, predicción de una próxima angina de pecho, infarto, embolia, el rompimiento de huesos. La cuestión es si queremos que nos inserten nano-robots o llevar parches, y ver si eso puede servir para otros fines (publicidad) o control de las vidas: cuidado con los servicios gratuitos.

Niño perdido en la calle: patrón de voz reconocible, cual huella dactilar. Encontrar de manera segura a sus padres o tutores. Ese lloro del bebé o ese grito de la mascota: traductor de eventos en lenguaje articulado y con la posibilidad de hacerlo a variados idiomas. Traductores de avería en dispositivos electrónicos. Ese es un lento aprendizaje de por vida que no siempre adquirimos de manera completa. Sistemas expertos que en ancianos detecten cambios súbitos en la calidad del lenguaje: indicativo de inminencia de un ictus cerebral. Y si se le acaba el plasma o el oxígeno en un hospital a alguien que está solo en una habitación (monitorización por sonido: escuchar su respiración, palabras: todo debe quedar registrado para dar alertas. Muy en especial si en fin de semana no hay especialistas en los hospitales: que el personal de enfermería de guardia, en conexión con una central de médicos, dé tratamiento de urgencia.

**6. 5.- Las artes**. La captación del sonido con fines estéticos, artísticos, expresivos, es consecuencia de todo lo anterior. Una aproximación a manifestaciones que ya se dan: robots músicos, pintores, danzantes (ver caso de Blanca Li[3]). Y la retroalimentación de los mismos: comunicarse entre ellos y reajustar sus acciones. Robots sensores midiendo aplausos-el éxito de una obra, (Peligro: la existencia de androides *clac* o aplaudidores para la falsación del éxito de los anteriores). Y nuevos dispositivos[4] que buscan elementos de disfrute. Y un divertido cuestionamiento de la autoría del arte ¿sería del ser humano, de la máquina?.

*** Más Entornos.- Macrocosmos**.-Las estrellas, los púlsares, los planetas vibran, los radares captan algunas de esas vibraciones dando datos de distancia, dimensiones y actividad. Muchas incógnitas sobre el origen del universo podrían aclararse con tecnologías avanzadas de la escucha. Y adelantar el momento en que un asteroide cruzase nuestros cielos, por si acaso. Y más ¿somos escuchados por una civilización superior? En espiritismo y en ufología hay una obsesión por el sonido como fuente de conocimiento paralela a la vista, aun con carencia de evidencias científicas de la existencia de espíritus y ovnis. La solución sería no contactar con ellos por si acaso, según indica Stephen Hawking, pero al menos debemos oírlos -matizamos. * **Más entornos.- Microcosmos**: mundo microscópico; nivel atómico; partículas subatómicas.-Pregunta: ¿podremos llegar a oír a nivel atómico-subatómico? ¿Qué finalidades podría tener? ¿Podremos prevenir una explosión en cadena, por ejemplo, en compuestos inestables, se sepa o no previamente cómo son? Todo un reto para la miniaturización de la microfonía y refinamiento de su rango de captación de sonidos y reformulación de su concepto.

**7.- FORTALEZAS: - el con qué-Dispositivos, tecnología**……A).- La tecnología suele ser atractiva, flexible, variada, con un progresivo abaratamiento. B).- Hay sensores en múltiples dispositivos: familiaridad. *Smartphones*, *wearables*, domótica. Ahora mismo se interconectan todos, pero en el MIT se vaticina que se prescindirá de estos dispositivos: la pared de casa será la interfaz de todos. Y las *Google Glass* no terminan del salir al mercado en 2015, ¿pero qué tal unas *Google Ears*, proponemos, que tradujeran en información verbal o escrita el espectro de sonido que oigamos sobre unas *Google Glass*?. Las *Google Ears* superarían con creces como concepto a unas *Google Glass*. C).- Paneles de expertos y desarrollo de dispositivos.-Se puede desarrollar la I+ D con paneles multidisciplinares de expertos, incluyendo a ciegos, acústicos procedentes de distintos ámbitos, y músicos. Dispositivos: Nanorobots, *Drones*, Robots que oyen. La miniaturización de los circuitos integrados nos lleva de nuevo a los nano-robots, que pueden alojarse en espacios increíblemente pequeños; otros son drones -dispositivos voladores igualmente miniaturizados- y robots. El desarrollo de potentes sensores de sonido, tecnología que crece, será un aliado. En cuanto a un ser fronterizo, procedente de la ciencia-ficción, el *cyborg*, tenemos hoy en día con el implante coclear una aproximación: un oído electrónico para un humano con deficiencia auditiva severa. Pensemos en un humano sano con ese dispositivo le dotaríamos de una hiperestesia auditiva inducida artificialmente (y voluntariamente): podrá oír infrasonidos, bandas de frecuencia e intensidades imposibles, y será un *audio-cyborg*. Podríamos

[3] En su espectáculo *Robot*.
[4] La Universitat Pompeu fabra ha desarrollado la *Reactable*: dispositivo para la creación de música electrónica en vivo, que interactúa con otros dispositivos, manejados por el ser humano o por robots incluso.

pensar también en un exoesqueleto auditivo: una-cámara audífono-escafandra para la aumentación de la sensibilidad sonora en deambulación.

**8.- LOS CONTRAS Y LOS PROS. EN LA LIMITACIÓN ESTÁ LA OPORTUNIDAD: RETOS-OPORTUNIDADES I+D:** Sería necesario a día de hoy todo lo que sigue: filtrado de datos irrelevantes por sobresaturación, redundancia o simultaneidad de fuentes y tipologías de sonidos y tal vez imposibilidad de filtrado para algunos fenómenos. Sistemas de reconocimiento de voz: en algunos servicios telefónicos no es muy preciso. (Peligro en cibercrimen: suplantadores de voz tipo actores, con altas habilidades de impostación de patrones ajenos. Podemos aprender a tener una firma, pero ¿podemos aprender a tener una voz para un momento y otra para otro? Además, en tecnologías en el móvil: desconocimiento de lo que descargamos con una app: sería un peligro para tecnologías basadas en sonido: invasión de la *privacy*, *gossipism*?). Cortes súbitos de electricidad, sin transmisión o registro de datos: baterías autogestionables de urgencia. Necesidad de miniaturización de dispositivos, incremento de potencia, resistencia,durabilidad. Desarrollo de materiales: más ligeros, superconductores, y almacenamiento de datos a niveles mucho mayores (almacenamiento cuántico). Sensores de sonido en ciudad: más que un sonómetro de medición de ruido: sensores de variables y fuentes de sonido y que filtrasen frecuencias con respecto a otros fenómenos acústicos como eco, reverberación, apantallamiento, etc, para poderlos detectar.

Envío de esa información *in itinere* a responsables sin pérdida sensible de la misma. La puesta al día a tiempo real de software experto para *data warehouse* al tiempo que se transmiten datos continuamente, sin pérdida de los anteriores. Monitorización de posible actividad alocada de las máquinas que contravengan las leyes de la robótica. Escafandras sónicas para sumergirse en ruidos; cámaras anecoicas portátiles en la calle: ni oír ni que me oigan. (¿Dónde está la libertad?), Si los sonidos de avería del ordenador avisan exactamente donde está el problema al usuario ¿no va contra los intereses de la industria, estando los dispositivos pensados para romperse por obsolescencia programada? Seguimiento mucho más potente de la delincuencia organizada: reconocimiento de voz por lingüística forense (análisis de timbre de voz + patrones lingüísticos + fisiognomía avanzada de delincuentes, etc.).

**9.- MI OÍDO ES MI CEREBRO: PROBLEMAS PSICO-EDUCATIVOS-ATENCIONALES**

Frente a ciudades tontas para listos, como puedan ser las actuales, ¿no podremos estar creando en un futuro ciudades inteligentes para bobos, por atrofia auditiva?. Hay un tema educativo: no delegar en las máquinas toda la escucha, combinándolo con una buena estimulación infantil para aprender a oír desde bebé y suplir a la máquina si es necesario. Saturación de estímulos sonoros: conducente a hiperactividad. Una carencia de atención a las señales deviene en *síndrome del pastorcillo mentiroso*. Además, la no estimulación en sonido frenaría el nivel de desarrollo de otros tipos de inteligencia. Necesidad de reeducación a alto nivel de capacidades auditivas perdidas: Método Tomatis. Para decir que algo es controlado se dice que es auditado, y es término de elemento de control de una empresa externa estudiando objetivamente las cuentas de otra con la que no debe de tener ningún tipo de relación. En todo caso, el sentirse demasiado escuchado ¿no podría desarrollar paranoias individuales o colectivas de escucha sonora?

**10.- PROBLEMAS LEGALES: Marco jurídico.-** Revisión o creación jurídica de la captación y utilización del sonido en el ámbito de las ciudades mediante dispositivos, máquinas, robots y *cyborgs*. Esos procesos deben respetar los Derechos Universales, los Derechos Humanos (ONU), la Constitución Europea y equivalentes supranacionales, los Derechos Nacionales, y cómo no, todo ello dentro de un concepto de buenas prácticas industriales y de buen gusto.

**11.-CONCLUSIONES: PROBLEMAS MORALES y HACIA UN CÓDIGO DEONTÓLOGICO**.
Antes de abordar todo lo anterior habría que prestar atención a las grandes cuestiones:

* Me da seguridad el saber que soy auditado-oído para mi seguridad, intereses (salvarme la vida, mi economía, mi comodidad), pero me da inseguridad saber que soy oído-auditado para intereses ajenos y más aún, desconocidos, (escuchas telefónicas, grabaciones clandestinas). Las tecnologías del sonido podrían suponer una fiscalización excesiva de la vida de los ciudadanos?

No más que otras fiscalizaciones, pero no por ello debemos de bajar la guardia. Se pueden sacar erróneas consecuencias del tratamiento inadecuado de datos sobre entornos laborales silenciosos: inducirían al sistema a pensar que el trabajador está ocioso, al ver la medición de la frecuencia de pulsaciones en un ordenador, con sospechas de fraude a la empresa. Llevaría a pensar paranoicamente mal por defecto, como el ciego del *Lazarillo de Tormes.*

Código deontológico: que partiese también de las leyes de la robótica de Asimov. "Ningún robot hará daño a un ser humano", etc. Desarrollo de una ética en torno al comportamiento esperado que se desarrolle en los robots, prestando atención al despertar de su conciencia, como por ejemplo sobre sus propios derechos, cercanos a los de los humanos: el percibir derechos de autor ¿por generar una obra de arte?. Pero si el ser humano es centro de todo ¿dónde está la inteligencia de las ciudades? En quien maneja y usa los datos. Tal como el *facility management* plantea, los medios y recursos aparecen en beneficio de la industria energética, y la banca. Que el *Smartphone*, y otros dispositivos *wearables* y domóticos, conectados a toda una intrincada red, sea un elemento de protección a la población más allá de ser receptáculos emisores de minería de datos a cambio de servicios pretendidamente gratuitos gestionados desde un servidor fuera del entorno jurídico de nuestro Estado. Hay que ver a qué intereses servirían por medio del sonido las *Smart Cities,* que ofrecen calidad de vida: ¿a los estados, gobiernos, ciudadanos, o a las diferentes industrias, en especial productores de energía y entidades financieras?

## 12.- ÚLTIMAS VALORACIONES

* No nos engañemos, que los anteriores no serían los mayoritarios beneficiarios de las tecnologías descritas si bien generarían un área de actividad inmensa, que ya se da en parte; cualquiera de nosotros será el primer consumidor de alguna en cuanto salga al mercado, Por ello instamos desde aquí a todos los acústicos para ponerse a trabajar ya. Muchos de los problemas vinculados a sonido surgen de nuestra civilización, y si bien la tecnología puede ayudar a solucionar, mitigar, paliar dichos problemas, lo mejor sería replantear nuestro modo de vida. Pero prescindir de esas tecnologías sería renunciar a una cultura construida a lo largo de los siglos en Occidente. El sonido y el mundo de las vibraciones son todavía grandes desconocidos y se necesita tecnología para su investigación, desarrollo de dispositivos basados en ellos y monitorización contínua de la efectividad de los existentes. Las tecnologías que nos aíslen del sonido problemático para la salud (ruido) y que filtren el sonido como fuente de información para la supervivencia supondrán la diferencia entre civilizaciones que sobrevivan en la ruidosa ciudad, llena de ricos datos, y que sean auditivamente inteligentes, o que auditiva y vitalmente perezcan en un páramo vacío de dispositivos de captación y procesamiento. Asimismo, el manejo de datos sensibles sobre eventos sonoros vinculados a ciudadanos puede convertirse en una fiscalización, una *auditación* inadecuada de vidas que delegan sus seguridad y confort en tecnologías beneficiosas y protectoras basadas en sonido. Estas tecnologías deben dar realmente oportunidad al ser humano para liberarse de rutinas, proporcionar más confort y dedicar más tiempo suyo al llamado crecimiento personal. Porque una vida dedicada a ganar dinero para pagar facturas de cosas que no da tiempo a disfrutar no merece mucho la pena. Pero una vida simplificada con las tecnologías ya descritas permitiría poner al alcance de la población tecnologías que salven vidas y mantengan la salud.

UN ALEGATO.- NO más seres humanos fallecidos por ahogamiento o más explosiones en minas, industrias; NO más seres vivos en contenedores o huecos imposibles de medios de transporte: NO más víctimas de desplomes, derrumbes, árboles caídos, ciudades arrasadas por ciclones. NO más reses muertas por alimañas en el silencio de la noche. NO más niños perdidos, ni o adultos con facultades mermadas sin identificar. Salvar la vida, Darle dignidad a la vida. Liberar a la vida de cargas pesadas y rutinas. Si además de eso cuidamos el estanque con nenúfares y cisnes, y nos echamos en el sofá a escuchar música (exquisitamente procesada y con los mejores micrófonos, y altavoces), merecerá más la pena vivir la vida. La Acústica lo hará posible.

## BIBLIOGRAFÍA:

DAUMAL, F, y LUCEÑO, M.L**: "Primer (2013) y Segundo (2014) Dia Mundial Del sonido, virtual o no".**

En**:** *Tecniacústica, 45º Congreso Español de Acústica. Publicación oficial del Congreso*. 2014. ISBN: 978-84-87985-25-6 e ISSN digital: 2340-7441.

DAUMAL, F, CERDÁ, J, y LUCEÑO, M.L**: "Día del Sonido, (Virtual o no) o Día de la Escucha".** En**:** *Tecniacústica, 44º Congreso Español de Acústica. Publicación oficial del Congreso*. 2013. ISBN: 978-84-87985 e ISSN digital: 2340-7441.

LUCEÑO, Maria Luisa y DAUMAL, Francesc: "**Dia Mundial del Sonido, 22 de Octubre: una iniciativa nacional para una efeméride mundial".** En: *Revista de Acústica*, Vol, 45, Nos. 1 y 2, 2014, pp. 51-56.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CONCIENCIACIÓN E IMPLICACIÓN CIUDADANA EN LA LUCHA CONTRA EL RUIDO DEL OCIO EN MÁLAGA

PACS: 43.50.Rq, 43.50.Sr

Luis Medina-Montoya[1], Antonio J. Ruiz[2], Aitor H. Castillo3, Juan Manuel López[3], Jesús Alonso[3], César Asensio[3]
[1] Dirección General de Medio Ambiente y Sostenibilidad, Ayuntamiento de Málaga
Avda. Cervantes 4, 29401 Málaga - lmedinam@malaga.eu
[2] Vatia Energía S.L.
c/ Marie Curie, 8, Edificio B, 29590 Málaga – ruido@vatia.es
[3]Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada (I2A2) – Universidad Politécnica de Madrid
Ctra. Valencia km 7, 28031 Madrid – info@i2a2.upm.es

## ABSTRACT

Málaga City Council has set the goal of mitigating noise produced by leisure activities, restaurants and bars by developing a strategy that starts with noise assessment throughout 2015. This is an initiative that aims to engage with citizens in an attempt to get feedback and interaction and is intended to raise awareness at all levels of society. It is especially important to achieve the participation of noise stakeholders, for instance, the residents of those noisy areas, who have to be put at centre stage, and who must perceive the rest of the stakeholders' concerns.

## RESUMEN:

El Ayuntamiento de Málaga se ha propuesto luchar contra el ruido asociado a las actividades de ocio y restauración, desarrollando una estrategia que arranca con la diagnosis del problema a lo largo de 2015. Esta iniciativa pretende involucrar a la ciudadanía, y lograr una interacción que permita concienciar a la sociedad en todos sus niveles, siendo especialmente necesario lograr la participación de aquellos agentes más expuestos al problema del ruido, como pueden ser los residentes en una zona de ocio, a los que es preciso colocar en el foco de atención, y transmitirles claramente esta circunstancia.

## 1. Introducción

El ruido asociado a las actividades de ocio y restauración es uno de los problemas medioambientales de mayor importancia en la ciudad de Málaga. Se trata de un problema cuya gestión es compleja, puesto que está íntimamente unido al desarrollo económico del municipio, y está muy ligado a la propia actividad de la ciudad y de los ciudadanos que la habitan. Se trata de un problema que se extiende a lo largo de todo el año, pero se ve agravado en la época estival, debido a que hay un mayor número de personas en la calle, durante un horario más amplio, unido a la circunstancia de que el incremento de temperaturas conlleva la apertura de ventanas en las viviendas.

El Ayuntamiento se ha propuesto abordar la problemática de los residentes que sufren los efectos de este contaminante, y para ello está desarrollando una estrategia que se inicia con la diagnosis del problema a lo largo de 2015. En este caso, la diagnosis combinará los datos objetivos que adquiere un sistema de monitorado de ruido, con la información subjetiva que pueden ofrecer los propios ciudadanos. Se trata, por tanto, de desplegar las herramientas necesarias para caracterizar adecuadamente la fuente de ruido, pero consiguiendo involucrar a la ciudadanía, así como de lograr una interacción que permita concienciar a la sociedad en todos sus niveles, para lo cual es especialmente necesario conseguir la participación de aquellos agentes más expuestos al problema del ruido, como pueden ser los residentes en una zona de ocio, a los que es preciso colocar en el foco de atención, y transmitirles claramente esta circunstancia.

### 1.1 Indicadores de ruido y definiciones

La contaminación acústica en un ambiente urbano está compuesta por un conjunto de sucesos sonoros que, por lo general, son difíciles de caracterizar por separado. Por ello, este contaminante se describe habitualmente mediante índices que permiten analizar conjuntamente la acumulación de energía acústica. El nivel sonoro continuo equivalente ($L_{Aeq,T}$ definido en la norma ISO 1996(1, 2)) valora el promedio de energía acústica existente en una ubicación durante un determinado período de evaluación (T). Este índice permite evaluar simultáneamente, con una única cifra, y de manera totalmente objetiva, el conjunto de sucesos sonoros que se producen en una localización durante un intervalo temporal determinado, y tiene en consideración la duración e intensidad de todos los sucesos sonoros que se han producido.

Por otra parte, es de sobra conocido que la sensibilidad de las personas frente al ruido varía a lo largo del día. Por ejemplo, un sonido prácticamente imperceptible durante el día, puede despertarnos durante la noche. Es por ello que el ruido se evalúa en tres períodos de referencia diferentes: día (comprendido entre las 07 y las 19 horas), tarde (comprendido entre las 19 y las 23 horas) y noche (comprendido entre las 23 y las 07 horas). Por lo tanto, la contaminación acústica se evalúa con un único índice ($L_{eq,T}$), que es aplicado de forma independiente a cada uno de los tres períodos. Como consecuencia, la contaminación acústica se describe mediante tres indicadores (uno por cada período de referencia) que el Real Decreto 1367/2007(3) define de la siguiente manera:

- Ld: Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período día
- Le: Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período tarde
- Ln: Nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, determinado en el período noche

Tras definir los indicadores que permiten evaluar el ambiente sonoro un día cualquiera del año, la contaminación acústica la determinaremos a partir de la observación a largo plazo de los niveles sonoros. La determinación de un nivel sonoro equivalente promedio anual, para cada período de evaluación, permite a los responsables de la gestión del ruido adoptar medidas de control o planes de acción que minimicen la afección producida por el contaminante, de forma general, descartando valores atípicos que podrían no ser representativos del ambiente sonoro general de la zona.

Por lo tanto, la contaminación acústica se determina a partir de una observación de largo plazo de cada uno de los indicadores Ld, Le y Ln. Son estos indicadores de largo plazo los que determinan, en primer lugar, si la calidad acústica en una zona es la adecuada, en función del uso del suelo que predomina en ella (residencial en todas las localizaciones de este proyecto). Es para estos indicadores de largo plazo para los que la legislación(3-7) establece unos valores objetivo, que pretenden garantizar la calidad acústica en una determinada zona. Dichos objetivos de calidad son de 65 dBA para los períodos de día y tarde, y 55 dBA para el período de noche.

Ahora bien, al tratarse de indicadores de largo plazo, podría darse la circunstancia de que un cumplimiento en promedio de los objetivos de calidad acústica en un punto, estuviera asociado a superaciones de los objetivos en un número de días relevante (para alguno de los períodos día, tarde o noche). Es por este motivo que la legislación establece un requisito adicional de garantía: el nivel sonoro de cada período (Ld, Le y Ln) no podrá ser superado en más de 3 dBA ninguno de los días del año, siendo admisible una superación inferior a 3 dBA tan sólo de forma excepcional (menos del 3% de los días).

## 2. Campañas de medida

Como punto de partida, con el objetivo de diagnosticar de manera objetiva los niveles sonoros existentes en la ciudad, se han planificado diversas campañas que en total contarán con 40 ubicaciones de medida. A lo largo de las campañas de medida, los datos han estado accesibles a los ciudadanos en tiempo real a través de una plataforma web creada a tal efecto, y finalizada cada una de las campañas de medida, se han publicado los correspondientes informes en la web del proyecto.

### 2.1 Ámbito geográfico y Localización de los puntos de medida

La primera de las campañas de medida se llevó a cabo entre los meses de abril y junio de 2015, en un total de 9 localizaciones. La siguiente figura muestra la distribución espacial de los 8 puntos de medida seleccionados en la Zona Centro, que es una zona marcada principalmente por una gran concentración de terrazas y locales de ocio, con calles estrechas, muchas de ellas peatonales. El último punto de medida se seleccionó en la zona de la Avda. Plutarco, que es una residencial situada a las afueras, caracterizada por amplias avenidas.




*Figura 1. Localizaciones de la Zona Centro (Campaña 1)*

## 3. Las mediciones

Los monitores de ruido que se han instalado en Málaga obtienen un registro continuo de mediciones cortas, de un segundo de duración ($L_{Aeq,1s}$ medido en dBA).
Este tipo de mediciones permite una mayor cercanía al ciudadano, especialmente en el acceso web a los datos de medida, ya que con ellas se puede observar la evolución temporal del ruido en el corto plazo, según se van obteniendo las mediciones.

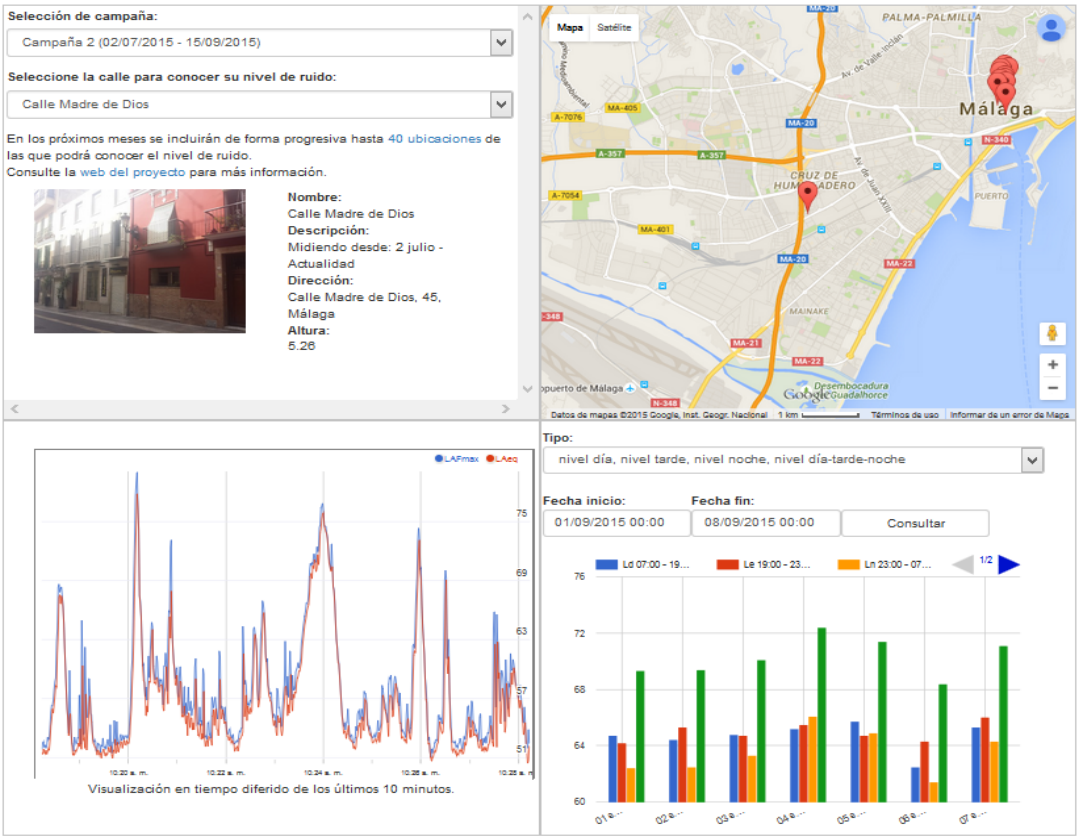



*Figura 2. Acceso web a las medidas en tiempo real*

Los resultados de dichas mediciones han sido convenientemente procesados, para obtener los resultados diarios y los resultados de largo plazo que permiten valorar la calidad acústica de cada una de las localizaciones.

## 4. Resultados

### 4.1. Resultados de Largo plazo

En las figuras 3 y 4 se describe el ambiente sonoro promedio existente en las diferentes localizaciones a lo largo de la campaña de medida.

Se han tomado como referencia para el análisis los objetivos de calidad acústica que se definen en la legislación: 65 dBA para los períodos de día y tarde, y 55 dBA para el período nocturno. Atendiendo a este criterio, debe indicarse que, con alguna excepción, dichos objetivos de calidad se cubren de manera razonable en el período día (entre las 07 y 19 horas). Sin embargo, en el período vespertino los niveles sonoros aumentan entre 2 y 5 dBA en la práctica totalidad de los puntos, debido la mayor actividad de bares y terrazas. Esto ocasiona un incumplimiento de los objetivos de calidad acústica del que sólo queda excluidos los monitores de Belgrano, Lazcano y Santa Lucía. Destacan especialmente los niveles registrados en la calle Méndez Núñez (Le=72 dBA) y en la Plaza del Siglo (Le=69 dBA), siendo estas localizaciones en las que mayor es el incremento registrado entre los perídos matutino y vespertino.

En lo que se refiere al período nocturno, la mayor sensibilidad frente al ruido que la legislación establece para este período hace que todos los puntos superen ampliamente los objetivos de calidad acústica prefijados, produciéndose las superaciones más importantes en los monitores de las calles Lazcano (Ln=71 dBA), Mendez Núñez (Ln= 69 dBA) y Santa Lucía (Ln=68 dBA).

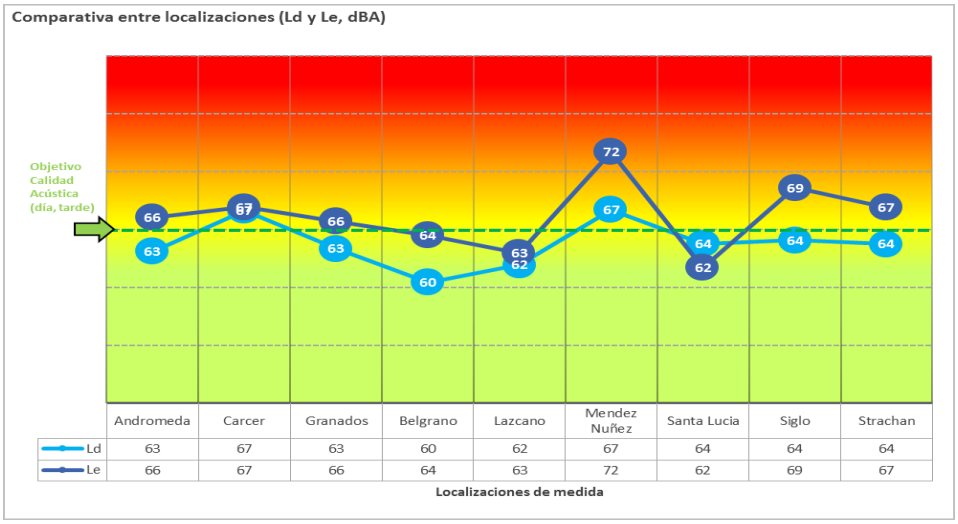



*Figura 3. Comparativa de los niveles Ld y Ld entre localizaciones*

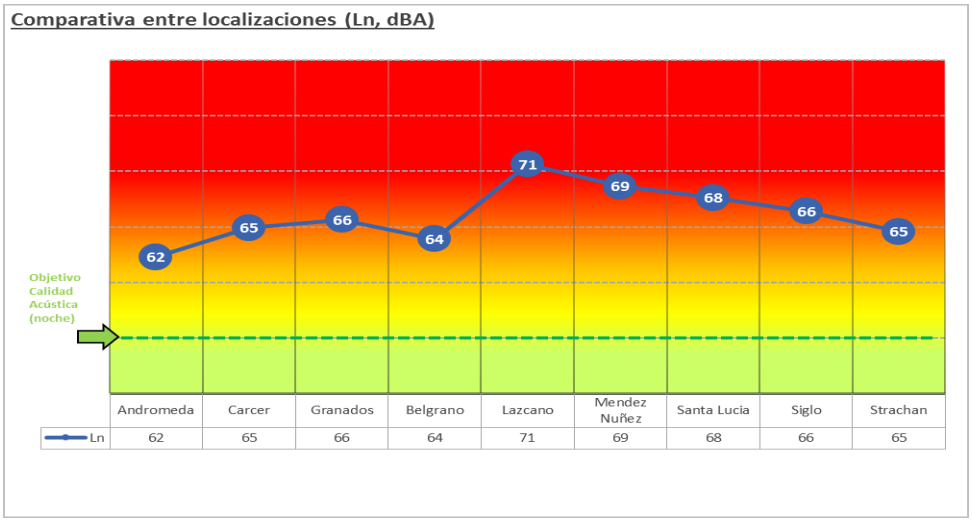



*Figura 4. Comparativa de los niveles Ln entre localizaciones*

### 4.2. Resultados de los valores diarios

El cumplimiento de los objetivos de calidad acústica se define en función de dos criterios diferenciados. Por una parte, se pretende que el ambiente sonoro medio a largo plazo en la zona quede por debajo de unos umbrales, tal y como se muestran en la sección anterior. Por otra parte, como garantía adicional, se establece que únicamente durante un pequeño porcentaje de los días del año se superen dichos umbrales. Uniendo ambos criterios se persigue garantizar un ambiente acústico razonable a lo largo de todo el año, evitando que los indicadores promedio oculten la existencia de épocas especialmente ruidosas.

En las gráficas que se muestran en la figura 5 observamos conjuntamente, para todas las estaciones de monitorado, el porcentaje de días del año en que se superan los umbrales determinados por los objetivos de calidad acústica en cada período.

Observamos que, mientras que en el período día el porcentaje de superaciones, por lo general, permanece en un porcentaje inferior al 20%, dicho porcentaje se incrementa notablemente en todos los puntos durante el período tarde. En el período noche, prácticamente el 100% de los días analizados, para todos los puntos, superan los umbrales que determinan los objetivos de calidad acústica.

## 5. Comunicación a la ciudadanía

Una parte importante del proyecto consistía en ofrecer al ciudadano herramientas de comunicación e interacción, para realizar valoraciones, presentar quejas, solicitar información, y mantener informados a los ciudadanos sobre los niveles sonoros a los que están expuestos.

El proyecto cuenta con una plataforma web que dispone de las siguientes funcionalidades:

- Visualización de resultados en tiempo real, tanto en web como en dispositivos móviles.
- Reportes de ruido, para diferentes períodos definidos por los usuarios.
- Twitter, para mantener informados a los ciudadanos de manera dinámica sobre los avances del proyecto, incidencias, llamamientos a la participación…
- Noticias referidas a los avances e incidencias del proyecto, de forma pausada y en detalle, en paralelo a la información de twitter.
- Participación ciudadana mediante un formulario web que permite la comunicación de quejas e incidencias acústicas, así como la valoración y descripción de la misma.

- Sondeos web sobre la problemática del ruido. Se trata de preguntas muy cortas y directas, que se publican semanalmente con el objetivo de mantener la visibilidad e incrementar la participación y concienciación en la ciudadanía.
- Encuesta online sobre la actitud ciudadana frente al ruido, mediante la que los ciudadanos pueden describir su percepción del ruido y las circunstancias que lo rodean.
- Repositorio de informes e información generada durante el desarrollo del proyecto.

## 6. Conclusiones

La campaña de medida fue diseñada desde sus inicios para describir principalmente el ruido del ocio, provocado fundamentalmente por la actividad asociada a bares y terrazas, tanto en la zona Centro de Málaga, como en la Avenida Plutarco, y se ha podido comprobar que es *precisamente el ruido del ocio el principal responsable de la contaminación acústica en las zonas de estudio*, si bien, en algunas de ellas existe también una cierta influencia del ruido de tráfico rodado, especialmente en el período diurno (en que la actividad de bares y terrazas es inferior).

*El ambiente sonoro en las zonas analizadas supera ampliamente los objetivos de calidad acústica que la legislación prevé*. Dicha superación resulta menos evidente en el análisis de los indicadores de largo plazo correspondientes a los períodos día y tarde, pero *es sumamente relevante en el período nocturno*, quedando patente en todos los puntos de medida. *La superación de los objetivos de calidad acústica es un fenómeno cotidiano*, que se ha repetido día a día, de forma muy frecuente durante la campaña de medida. Dicha superación es bastante importante durante el período de tarde, y absoluta durante el período noche.

*Los objetivos de calidad se superan de forma sistemática durante el período nocturno.* El nivel sonoro equivalente de las 8 horas del periodo nocturno (Ln) únicamente ha sido inferior a los 55 dBA de forma marginal, algunos días sueltos, en alguno de los puntos de medida.
En general, los niveles de ruido de las tardes y noches durante el fin de semana son más elevados que los días de diario. El incremento del nivel sonoro puede apreciarse a partir de la última hora de la tarde de los jueves, y alcanza los valores máximos en la tarde-noche del sábado.




*Figura 5. Superación diaria de los Objetivos de calidad acústica en las diferentes estaciones de monitorado*

La evolución hora a hora, muestra que el nivel sonoro es bastante elevado durante el período nocturno, siendo escasos los períodos en los que el nivel sonoro promedio de una hora (LAeq,1h)desciende por debajo de los 55 dBA. Dependiendo de los puntos de medida, dichos períodos de "relativa calma" tienen una duración de entre una y tres horas, y se concentran principalmente entre las 4 y las 7 de la mañana. En casi todos las localizaciones evaluadas dicho período "tranquilo", por debajo de 55 dBA (LAeq,1h) desaparece en el fin de semana, existiendo también localizaciones en los dicho nivel no se alcanza en ningún momento (Cárcer y Méndez Núñez). Esto implica que, a pesar de que existen períodos de la noche en los que se concentra una mayor actividad ruidosa, dicha actividad apenas se extingue a lo largo de la noche, por lo que *son escasas las horas nocturnas en las que existe un ambiente sonoro compatible con el uso residencial*.

En lo que se refiere a la participación ciudadana, gracias a la estrategia de comunicación del proyecto, y al soporte institucional recibido por parte del Ayuntamiento de Málaga, se ha conseguido dar un cierto grado de visibilidad a la iniciativa, principalmente notable en la participación de los malagueños en la encuesta sobre Ruido Urbano, que ha superado ampliamente la participación media a nivel estatal. A pesar de que la encuesta se sigue ejecutando en la actualidad, podemos extraer algunas conclusiones preliminares: más de la mitad de los participantes en la encuesta conocían la existencia del proyecto de monitorado de ruido, de ellos únicamente un tercio no conocía la existencia de las herramientas online relacionadas con el proyecto, mientras que más del 60% manifiestan haberse conectado o tener intención de hacerlo en el futuro.

**Referencias**

1. ISO. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels.ISO 1996-2:2007 . 2007.

2. ISO. Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 1: Basic quantities and assessment procedures.ISO 1996-1:2003. 2003.

3. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. (23 octubre 2007, 2007).

4. REAL DECRETO 1513/2005, de 16 de diciem- bre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. (17 diciembre 2005, 2005).

5. Ordenanza para la prevención y control de ruidos y vibraciones, Boletín Oficial de la provincia de Málaga (19 de mayo de 2009, 2009).

6. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the council of 25 june 2002 relating to the assessment and management of environmental noise, 2002).

7. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, 37, (18 noviembre 2003, 2003).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SALUD URBANA Y RUIDO

PACS: 43.50 RQ.189

De Gortari, Jimena
1 Departamento de Arquitectura-Universidad Iberoamericana Ciudad de México
Prol. Paseo de la Reforma 880, Lomas de Santa Fe
01219México D.F. México
(52 55) 5950 40 00 ext. 74499
E-mail: jimena.dgortari@ibero.mx

## ABSTRACT

Urban health is a branch of health human studies of individuals who live and carry out their daily activities in and around cities. The World Health Organization identifies that planning and urban design have a direct impact on the health of people living in cities. herefore urban health study involves analyzing the relationship between public health and the built environment: practices and models of urban growth of cities and the impact they have on the welfare of the inhabitants. Within urban diseases that affect developing countries and are strongly linked to the design of the city include, among others, diseases related to noise pollution.

Keywords: noise pollutions, health, urban health, noise, urban design.

## RESUMEN

La salud urbana es una rama de la salud que estudia la salud humana de los individuos que viven y desarrollan sus actividades cotidianas en las ciudades y sus alrededores. La Organización Mundial de la Salud identifica que la planeación y el diseño urbano tienen un impacto directo en la salud de las personas que viven en las ciudades. Por lo tanto, estudiar la salud urbana implica analizar la relación que existe entre la salud pública y el entorno construido, es decir las prácticas y modelos urbanos de crecimiento de las ciudades y el impacto que estos tienen en el bienestar de los habitantes.
Dentro de las enfermedades urbanas que afectan a los países en vías de desarrollo y que están fuertemente vinculadas al diseño de la ciudad destacan, entre otras, las enfermedades derivadas de la contaminación acústica.

Palabras clave: contaminación acústica, Salud, salud urbana, ruido, diseño urbano.

## SALUD URBANA

La salud urbana es una rama de la salud pública que estudia, en un momento histórico determinado, los factores políticos, sociales y económicos (a nivel local, regional y global) que determinan la salud humana de los individuos que viven y desarrollan sus actividades cotidianas en las ciudades y sus alrededores (Primera Reunión del Foro Regional de Salud Urbana de la Organización Panamericana de la Salud, 2007). De igual forma la Organización Mundial de la Salud (OMS), que desde 1946 viene promoviendo la salud de las personas, identifica que la planeación y el diseño urbano tienen un impacto directo en la salud de las personas que viven en las ciudades. Por lo tanto, estudiar la salud urbana implica analizar la relación que existe entre la salud pública y el entorno construido, es decir las prácticas y modelos urbanos de crecimiento de las ciudades y el impacto que estos tienen en el bienestar en los habitantes.

Dentro de las enfermedades urbanas que afectan a los países en vías de desarrollo y que están fuertemente vinculadas al diseño de la ciudad la OMS identifica principalmente a las enfermedades no transmisibles (ENT), también conocidas como enfermedades crónicas. Entre estas destacan: enfermedades cardiovasculares derivadas de estrés u otros factores, enfermedades respiratorias crónicas resultado de la alta contaminación atmosférica, enfermedades derivadas de la contaminación acústica (ruido) y, obesidad y sobrepeso, resultado de varios factores dentro de los cuales destacan la mala alimentación y estilos de vida sedentarios o no saludables.

Considerando el rol de las ciudades a través del tiempo se les puede considerar como espacios de concentración de personas, oportunidades y servicios.

Desde una perspectiva económica, son centros de promoción de empleo y de prosperidad individual y colectiva. Desde una visión social, se consideran como bancos de capital social, es decir, espacios con el potencial de favorecer el desarrollo e intercambio de ideas, valores culturales y sociales. Política y administrativamente, son espacios de equidad e inclusión en donde se permiten y se enfrentan diversas posturas ideológicas.

Ambientalmente, las ciudades se promueven como espacios donde existen mejores condiciones que favorecen estilos de vida saludables. El objetivo principal de la planeación y diseño de las ciudades es buscar las mejores condiciones para el bienestar y salud de sus habitantes.

No obstante los contextos urbanos actuales; particularmente aquellos que se encuentran en países en vías de desarrollo; son incapaces de promover estilos de vida adecuados a las necesidades de la población. Es decir, carecen de las características adecuadas para conseguir el bienestar de sus habitantes.

La OMS identifica algunas tendencias críticas con respecto a la planeación y diseño de las ciudades que tienen un impacto directo en la salud y bienestar de la población y que deben ser consideradas para efectos de salud urbana. Estas son:

El crecimiento acelerado de las ciudades causado en gran parte por los altos flujos de migración de poblaciones rurales. Estos procesos migratorios no han sido asimilados de forma ordenada, ya que por un lado las ciudades no estaban preparadas para recibir tal cantidad de población y por el otro, estos grupos no logran ser integrados a los procesos de desarrollo económico, político y social de la ciudad.

El modelo de desarrollo de las ciudades actuales es el de la ciudad extendida, poco densa, desarticulada y periférica que contribuye a desigualdades en la calidad y oferta de oportunidades para diversos sectores de la población. Esto ha generado que la población desarrolle hábitos de consumo, movilidad, vivienda y esparcimiento no adecuados a las características y condiciones de las personas. De acuerdo a la misma OMS esto puede impactar fuertemente en la salud y bienestar de la población.

Los impactos de estos modelos de desarrollo igualmente generan altos costos para la ciudadanía y el país en su conjunto limitando las capacidades de los gobiernos locales para proveer de servicios

públicos básicos a sus ciudadanos como pueden ser: servicios de salud y educación y de una infraestructura esencial para su adecuado desarrollo.

En consideración a lo anterior se identifican a algunos sectores de la población como los más vulnerables a las tendencias de la planeación y diseño de las ciudades contemporáneas. Dentro de estos grupos se encuentran los desempleados, personas sin oficios o habilidades, adultos mayores y niños; grupos que experimentan exclusión – económica y social – de un sistema dado (Banco Mundial).

De igual manera, académicos enfocados al contexto de la planeación identifican a mujeres de bajos ingresos económicos - altamente excluidas de los procesos de toma de decisiones -, niños – invisibles en los procesos de urbanización y de participación en la ciudad -, adultos mayores – altamente excluidos -, discapacitados y jóvenes adultos (Masolo, 1994). Estos grupos se categorizan como grupos vulnerables.

La OMS considera los siguientes ejes, acciones y objetivos para el desarrollo de las ciudades saludables: (i) promover planeación urbana para fomentar comportamientos saludables y entornos seguros, esto puede considerar la promoción de la actividad física, mejor disposición de alimentos saludables; (ii) mejorar las condiciones de vida que incluye la localización de vivienda en lugares seguros, la mejora de las condiciones de vivienda, el control de la contaminación, entre otros; (iii) asegurar prácticas de participación ciudadana que considere la actuación de todos los grupos sociales sin importar de su edad, género o condiciones socio-económicas en los procesos de toma de decisión; (iv) construir ciudades accesibles e inclusivas. Esto considera movilidad accesible y segura para todos, desarrollo de estrategias que promuevan caminar como un medio de transporte y por lo tanto estrategias para el diseño de espacios públicos adecuados para los usuarios; (v) considerar principios de resiliencia urbana para áreas vulnerables a emergencias y desastres.

De igual forma, el Principio 1 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo 2, considera que: "… los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tiene derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza…". Este principio considera como objetivos fundamentales, entre otros, la protección de los grupos vulnerables y la solución del problema de salud urbana.

Diferentes fuentes consultadas coinciden en que la vulnerabilidad se vuelve persistente cuando se conjugan la vulnerabilidad individual y un espacio con condiciones precarias (es decir entornos de "baja" calidad que no favorecen el desarrollo del individuo).

Considerar un enfoque para la planeación y diseño urbano de las ciudades desde la salud urbana presenta grandes oportunidades para retomar mejores criterios y prácticas para el desarrollo de entornos que favorezcan las condiciones de bienestar sobretodo de grupos vulnerables.

De acuerdo con el ICBEN (Comité Internacional de Efectos Biológicos del Ruido), un ambiente sonoro favorable debería, entre otros beneficios, promover la salud, la interacción social y proporcionar bienestar físico, mental y social a todos los miembros de una comunidad (Gjestland, 2002). Para ello se ha requerido que los estudios sociales desarrollen herramientas y métodos para evaluar la experiencia subjetiva, el significado y la relevancia que tienen los sonidos para las personas, y así poder definir cuáles son las características de un ambiente sonoro favorable para una comunidad determinada. Estos estudios se realizan aparte en zonas habitacionales, en espacios abiertos, parques, calles, plazas, etc (Ge y Hokao, 2004; Sheik y Uhl, 2004; Raimbault, et al, 2003; Yang y Kang, 2005) buscando encontrar parámetros de confort ambiental.

## SALUD URBANA EN MÉXICO Y RUIDO

En México este tema aún no ha sido explorado – la relación entre la salud y el entorno construido- el acelerado y desordenado crecimiento de las ciudades mexicanas, las cuales se han hecho, en su mayoría, sin planeación; contribuyen de manera importante a la salud de las personas. El contar con ciudades que fomentan el sedentarismo está ocasionando que cada día contemos con un número

mayor de personas que padecen de este mal, los deficientes y/o insuficientes sistemas de movilidad están promoviendo una sociedad estresada, el tener que recorrer enormes distancias entre origen y destino genera personas cansadas e irritables; a todo esto se le añade que se convive de forma cotidiana con niveles sonoros que superan en ocasiones los 90 dB.

El poder hacer la relación entre el entorno construido y la salud de las personas es la finalidad de este trabajo de investigación en curso[1] actualmente; el cual tiene como finalidad principal el promover políticas públicas adecuadas y mostrar buenas prácticas urbanas. En relación al ruido está enfocado en poner en evidencia el problema de salud que tenemos en la actualidad en las ciudades mexicanas, el impacto que esto tendrá en costos monetarios y en la sociedad en su conjunto. Y sin duda, lo más importante que tratamos de enfatizar es la necesidad de trabajar en una ciudad preventiva más que en una ciudad correctiva.



**Enfermedades derivadas de la contaminación acústica (ruido).**

Los países de Latinoamérica están cada vez más expuestos al ruido excesivo en el ámbito privado y público, lo que causa estrés, enfermedades cardiacas y miles de muertes cada año, según la OMS. A pesar de la existencia de leyes para controlar el ruido en los distintos espacios, éste prolifera en las zonas expuestas a alto volumen, la construcción de obras, el tráfico de vehículos, las ofertas de productos con altavoces y hasta la predicación religiosa con potentes equipos de sonido. Todas estas fuentes de ruido superan, los niveles de 50 o más decibeles que la OMS estableció como suficientes para originar problemas cardiovasculares.

Un informe de la OMS, publicado por la revista New Scientist en 2007, señaló que unos siete millones de personas mueren anualmente de males cardiacos en el mundo y que 210,000 de esos casos se atribuyen al ruido excesivo. Los países latinoamericanos tienen, con mayor o menor rigor, normas para evitar el ruido perjudicial, pero con poco cumplimiento.

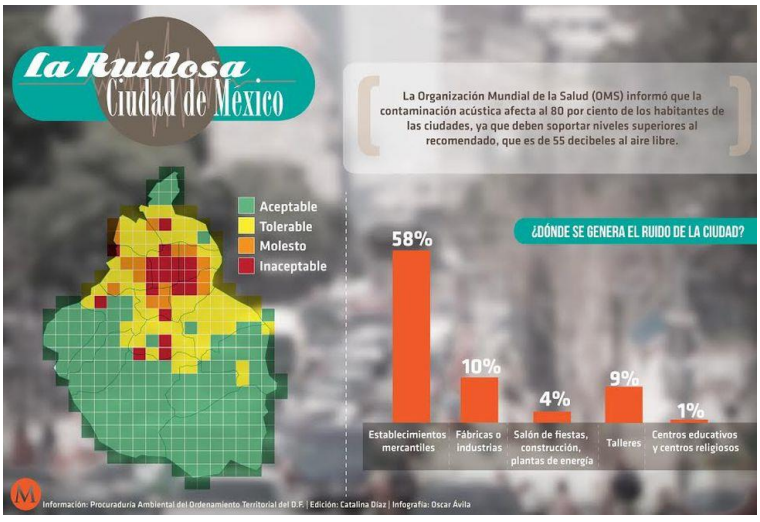
[1] El presente trabajo de investigación se lleva a cabo con la Dra. Célida Gómez del Departamento de Arquitectura de la Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Su investigación está enfocada en el trabajo de grupos vulnerables y obesidad.

En México, un país con más de 100 millones de habitantes y cuya capital está entre las ciudades con mayor contaminación industrial, visual y sonora del mundo, rige la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, que establece límites a las fuentes fijas generadoras de ruido. En esta norma se establecen los límites máximos permisibles de emisión de ruido para las zonas residenciales, industriales, comerciales, escuelas, ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento.



En la ciudad de México – entidad en donde se cuenta con la normatividad más estricta en esta materia en la República Mexicana -existe (desde septiembre del año 2006) una norma que reduce los límites de las fuentes fijas generadoras de ruido con respecto a las de la Norma Mexicana.

Un estudio muestra que el 15% de la metrópolis registra un volumen de ruido inaceptable para el oído humano, y que uno de los principales responsables son los más de tres millones de vehículos que circulan por la urbe (BBC), es decir, fuentes móviles para los que aún no existe regulación. La Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT) afirma que otras fuentes generadoras de ruido son los establecimientos mercantiles (restaurantes, bares y discotecas) para los cuales existe la Ley de Establecimientos Mercantiles que establece máximos permitidos al interior de los recintos.




La procuraduría destacó que la molestia auditiva es la segunda causa de denuncias que recibe, y se concentra principalmente en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza y Coyoacán, en donde más establecimientos comerciales se tienen registrados.

**Bibliografía**

Massolo, A., (1994). Mujeres y Ciudades. Participación Social, Vivienda y Vida Cotidiana, México**.** México.: El Colegio de México.
Mercado, P. y Vilchis, G (2013). La obesidad infantil en México en Alternativas en Psicología. Revista Semestral. Tercera Época. Año XVII. Número 28. Febrero-Julio 2013. Universidad Iberoamericana.
Organización Panamericana de la Salud (2008). **Primera reunión del foro regional de salud urbana de la Organización Panamericana de la Salud. Hacia un marco conceptual de salud urbana y agenda para la acción en las Américas.** Secretaría de Salud, México
Ruido y Salud (2012).*Observatorio salud y medioambiente, núm. 03,* España.
Van Kamp I., Davies, H. (2013). N*oise and health in vulnerable groups: a review*, Noise and health, may-june 2013, Volume 15:64, pp. 153-159.

Organización Mundial de la Salud
(http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/)
Secretaría de Salud
(http://www.salud.df.gob.mx/ssdf/index.php?option=com_content&task=view&id=4034)
Banco Mundial
(http://www.bancomundial.org/)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONSTATAÇÕES E SUGESTÕES PARA MELHORAR O CONFORTO E A INTELIGIBILIDADE ACÚSTICA PARA OS USUÁRIOS DO AEROPORTO TOM JOBIM, RJ/BRASIL

PACS: 43.55.Gx

Maria Lúcia Grillo; Luiz Roberto Baptista e Jeanne Denise Barros
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier 524, sala 3034D, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 20.550-013, Tel: 55-21-23340844, e-mail: mluciag@uerj.br; maestroluizroberto@ig.com.br e jeanne@ime.uerj.br

## ABSTRACT

Airports are generally, traffic places and often confused, particularly with respect to acoustics part which interferes with the understanding of messages, often poorly expressed and not suitable sound systems. In addition, the messages are executed very fast and hard to understand. Usually people are strained through the trip and everything should occur more calm and understandable way. Sound measurements are made and solutions proposed in our work which has as its source the International Airport of Rio de Janeiro, Tom Jobim, which is also known as Galeão.

## RESUMO

Os aeroportos são de uma maneira geral, lugares de trânsito e normalmente confusos, principalmente no que diz respeito à parte acústica, que interfere no entendimento das mensagens, muitas vezes mal formuladas e com sistemas de som não adequados. Além disso, as mensagens são executadas muito rápidas e difíceis de serem entendidas. Normalmente as pessoas estão meio tensas pela viagem e tudo deveria ocorrer de maneira mais calma e compreensível. Medições sonoras são feitas e soluções propostas no nosso trabalho que tem como fonte o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, o Tom Jobim, que também é conhecido como Galeão.

## INTRODUÇÃO

Segundo consta no site, o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão - Antônio Carlos Jobim está localizado na Ilha do Governador, a 13 km do centro da cidade do Rio de Janeiro, no Estado do Rio de Janeiro. Desde 1945 passou a ser, oficialmente, Aeroporto

Internacional. Em 1992, devido ao grande evento ECO 92, foram reformadas e ampliadas todas as instalações do Terminal 1, que passou a ter capacidade para sete milhões de passageiros por ano. Nessa mesma época foram iniciadas as obras de construção do Terminal 2, inaugurado em julho de 1999, com capacidade de atender oito milhões de passageiros ao ano. (AEROPORTO INTERNACIONAL ANTÔNIO CARLOS JOBIM, site)

No ano de 2012 foi lançado o "Programa de Investimentos em Logística: Aeroportos", um conjunto de medidas para melhorar a qualidade dos serviços e de toda a infraestrutura dos aeroportos e ampliar a oferta de transporte aéreo à população brasileira. Esse trabalho foi motivado pela concessão e privatização do aeroporto do Rio de Janeiro. Essa concessão, de 25 anos (prorrogável uma vez por até 5 anos), tem como objetivo a ampliação, a manutenção e a exploração do aeroporto, promovendo melhorias no atendimento e nos níveis de qualidade de todos os serviços prestados. Essas melhorias visavam em especial os eventos esportivos de 2014 (Copa do Mundo) e de 2016 (Olimpíadas Mundiais). Espera-se, com a conclusão das obras, uma capacidade para atender até 44 milhões de passageiros por ano, nos 2 terminais.

Os dois terminais possuem um total de 171 balcões de check-in, que operam 24 horas por dia. Há ainda um projeto para a construção de mais dois terminais de passageiros. Este aeroporto é o segundo com maior movimento do país. Em 2012 foram contabilizados 17,5 milhões de passageiros e o crescimento anual projetado de 2012 a 2038 é de 4,9% por ano, passando a 60,4 milhões. O investimento atual estimado é de R$ 5,7 bilhões, com a construção de estacionamento com capacidade mínima de 1.850 veículos, até 31 de dezembro de 2015 e a ampliação do Terminal 2 com no mínimo 26 pontes de embarque, construção de novo terminal de cargas e novo pátio de estacionamento de aeronaves, até 30 de abril de 2016 e até 2021 a construção de novo sistema de pistas independentes. (PROGRAMA DE INVESTIMENTOS EM LOGÍSTICA: AEROPORTOS - site)

Tabela 1: movimento anual de aviões, passageiros e carga 2010-2014 - Aeroporto Tom Jobim

**Movimento Anual de Aeronaves (Pousos + Decolagens)**

| Ano | Regular | | Não Regular | | | Total | Var. % Anual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Doméstico | Internacional | Doméstico | Internacional | Executiva/Geral | | |
| 2010 | 960.597 | 23.731 | 324.579 | 9.436 | 591.865 | 1.910.208 | - |
| 2011 | 1.086.104 | 25.807 | 326.902 | 8.678 | 607.672 | 2.055.163 | 7,59 |
| 2012 | 1.112.798 | 22.147 | 332.538 | 6.552 | 647.376 | 2.121.411 | 3,22 |
| 2013 | 1.052.773 | 17.106 | 319.102 | 4.815 | 619.595 | 2.013.391 | -5,09 |
| 2014 | 1.027.096 | 19.318 | 316.664 | 4.570 | 610.341 | 1.977.989 | -1,76 |

**Movimento Anual de Passageiros (Embarcados + Desembarcados)**

| Ano | Regular | | Não Regular | | | Total | Var. % Anual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Doméstico | Internacional | Doméstico | Internacional | Executiva/Geral | | |
| 2010 | 81.582.496 | 1.565.290 | 1.984.218 | 216.885 | 1.372.957 | 86.721.846 | - |
| 2011 | 94.453.774 | 1.799.112 | 1.940.519 | 238.401 | 1.472.718 | 99.904.524 | 15,20 |
| 2012 | 99.463.973 | 1.835.499 | 2.042.965 | 185.437 | 1.509.354 | 105.037.228 | 5,14 |
| 2013 | 100.194.159 | 1.730.120 | 2.659.516 | 112.058 | 1.224.884 | 105.920.737 | 0,84 |
| 2014 | 106.300.034 | 2.067.224 | 3.057.154 | 154.923 | 1.176.176 | 112.755.511 | 6,45 |

**Movimento Anual de Carga Aérea e Correios (t) (Carregada + Descarregada + Trânsito)**

| Ano | Regular | | Não Regular | | Total | Var. % Anual |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Doméstico | Internacional | Doméstico | Internacional | | |
| 2010 | 359.880 | 43.113 | 73.374 | 58.410 | 534.777 | - |
| 2011 | 502.548 | 53.102 | 53.672 | 59.072 | 668.393 | 24,99 |
| 2012 | 451.295 | 55.435 | 53.448 | 49.338 | 609.516 | -8,81 |
| 2013 | 455.550 | 65.178 | 45.669 | 30.408 | 596.804 | -2,09 |
| 2014 | 469.165 | 69.187 | 38.790 | 18.887 | 596.030 | -0,13 |

O ambiente sonoro exterior de um aeroporto é conhecidamente ruidoso, e no momento os aviões não dispõem de recursos técnicos capazes de diminuir o ruído tão prejudicial à saúde, que depende do tempo de exposição ao ruído. O Manual de Implementação de Aeroportos, escrito pelo Instituto de Aviação Civil e pelo Comando da Aeronáutica apresenta a necessidade

de controlar o ruído gerado por aeroportos no seu entorno. Há inúmeros estudos para melhoria do ambiente sonoro no exterior de aeroportos, especialmente do Tom Jobim, sem dúvida muito importantes. A norma brasileira NBR 10.151 estabelece as condições acústicas adequadas em áreas habitadas, em ambientes externos. A NBR 12.314 estabelece critérios de ruído para recintos internos nas edificações submetidas ao ruído aeronáutico.

Nossa abordagem neste trabalho diz respeito ao ambiente interno do aeroporto, onde praticamente não se ouvem os motores dos aviões. Em todo o planejamento para otimização do aeroporto, não encontramos nenhuma referência a planejamento de melhoria no conforto acústico do ambiente interno, nem na NBR 10.152, norma referente à acústica em ambientes internos.

No ambiente interno existem ruídos produzidos por aparelhos de ar refrigerado, pelas conversas das pessoas e outros equipamentos. Além disso, há o problema de alto-falantes mal direcionados e muitas vezes impróprios para informar os usuários e o próprio ambiente mal construído acusticamente, com tetos medindo cerca de 20 a 25 metros de altura que visualmente parecem suntuosos e elegantes, mas que avaliados acusticamente são impróprios e confusos se não forem usados materiais adequados nos revestimentos de paredes, tetos e chão. A mensagem deveria chegar aos ouvidos dos usuários como se alguém falasse bem próximo do receptor. As taxas de embarque cobradas nos aeroportos são onerosas, mas são necessárias para uma série de serviços prestados lá, inclusive o conforto acústico.

Normalmente se presta pouca atenção ao que se ouve num mundo em que vivemos, extremamente visual. Mas nos aeroportos muitas vezes precisamos entender trocas de portões de embarque, algum problema com bagagem ou como aconteceu com um dos autores deste trabalho no Aeroporto Tom Jobim em 2014, quando se dirigia para Frankfurt, já na área de embarque. Dirigindo-se para o banheiro, onde o teto é bem mais baixo, pode entender a última chamada para comparecer urgente ao balcão do portão de embarque. Quando se encontrava na área de espera não havia entendido nada da mensagem. Felizmente foi uma grata surpresa, pois a companhia aérea alemã havia trocado a passagem da classe econômica para a classe executiva (3 vezes mais cara) como presente. Quase perdeu esta generosa oferta por falta de entendimento da mensagem proferida na sua própria língua materna. Este é apenas um exemplo real do problema da falta de inteligibilidade das mensagens no Galeão (Tom Jobim) e do excesso de ruídos que são provocados por outros fatores que não os dos aviões.

Muitas pessoas têm medo de voar e para muitos torna-se quase uma tortura viajar de avião. Seria muito melhor para todos os envolvidos na viagem aérea que tudo transcorresse na mais completa calma e conforto, pois isso vai ser decisivo na hora de escolher a companhia aérea para o voo e até mesmo evitar determinados aeroportos.

Identificamos problemas de inteligibilidade nas mensagens e também ruídos acima dos níveis considerados adequados pelas normas brasileiras. Além dos passageiros, há também inúmeros funcionários no aeroporto, que passam muitas horas por dia num ambiente com ruídos que prejudicam de várias maneiras suas atividades e sua saúde. Problemas semelhantes foram encontrados no Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, de Brasília, pela empresa Anima Acústica, conforme pode ser visto em seu blog. (ANIMA ACUSTICA - BLOG)

## NORMA BRASILEIRA NA ÁREA DE ACÚSTICA DE INTERIORES - NBR 10.152

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, estabeleceu em 1987 quais são os níveis de ruído para conforto acústico, em diversos ambiente internos. Na tabela 2 estão listados os níveis adequados para cada ambiente. Nesta tabela o valor inferior representa o nível sonoro para conforto e o valor superior significa o nível sonoro aceitável para a finalidade. Os níveis superiores aos estabelecidos são considerados de desconforto, sem necessariamente implicar risco de dano à saúde.

Tabela 2 - Critério de Avaliação para ambientes internos, em dB (A)

| **Locais** | **Conforto - Aceitabilidade dB(A)** |
|---|---|
| Hospitais | |
| Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros cirúrgicos | 35 - 45 |
| Laboratórios, Áreas para uso do público | 40 - 50 |
| Serviços | 45 - 55 |
| Escolas | |
| Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho | 35 - 45 |
| Salas de aula, Laboratórios | 40 - 50 |
| Circulação | 45 - 55 |
| Hotéis | |
| Apartamentos | 35 - 45 |
| Restaurantes, Salas de estar | 40 - 50 |
| Portaria, Recepção, Circulação | 45 - 55 |
| Residências | |
| Dormitórios | 35 - 45 |
| Salas de estar | 40 - 50 |
| Auditórios | |
| Salas de concertos, Teatros | 30 - 40 |
| Salas de conferência, Cinemas, Salas de uso múltiplo | 35 - 45 |
| Restaurantes | 40 - 50 |
| Escritórios | |
| Salas de reunião | 30 - 40 |
| Salas de gerência, Salas de projetos e de administração | 35 - 45 |
| Salas de computadores | 45 - 65 |
| Salas de mecanografia | 50 - 60 |
| Igrejas e Templos (Cultos meditativos) | 40 - 50 |
| Locais para esporte | |
| Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas | 45 - 60 |

Podemos ver que não há referência a ambientes internos de aeroportos. Consideramos então os níveis previstos para escolas (circulação) ou hotéis (portaria, recepção, circulação), que são de 45 a 55 dB(A).

## CONFORTO ACÚSTICO E INTELIGIBILIDADE DA FALA

Os aeroportos são lugares de muitos passageiros, que precisam estar atentos aos horários e locais de embarque, caso contrário poderão perder seus voos. Devem ser também locais agradáveis, onde muitas vezes deverão permanecer algumas horas até o momento de embarque. O conforto acústico e a inteligibilidade da fala são então fatores importantes para que as atividades decorram de forma adequada e atinjam seus objetivos, principalmente para

os passageiros e os que trabalham no local. As condições acústicas adversas podem ser devido a tempos de reverberação não adequados para uma boa inteligibilidade ou mesmo níveis de ruído elevados, provenientes de diversas fontes.

Os níveis de ruído podem ser medidos com sonômetro, que pode fornecer o nível de pressão sonora, dado pela expressão:

$$L_P = 10\ log_{10}\left(\frac{P}{P_o}\right)\ [dB]$$

onde P é o valor eficaz da pressão em pascal (Pa) e $P_o$ a pressão sonora de referência, com valor de 20 μPa. A pressão sonora medida é a diferença entre a pressão instantânea do ar na presença de ondas sonoras e a pressão atmosférica.

Segundo Silva (2013), o ouvido humano não é sensível de igual forma às várias frequências. Sons com o mesmo nível de intensidade e de frequências diferentes não são percebidos de igual forma, mas sim como se atuassem em níveis diferentes. Desta forma surgem as curvas de igual sensibilidade auditiva. Os sonômetros medem o nível de pressão sonora por frequência sem depender da sensibilidade. Para que a medida feita seja semelhante à audição humana foi necessário inserir filtros de ponderação. Os filtros tendem a atenuar o nível sonoro de acordo com as curvas de ponderação. Segundo Rossing (1990) a medida mais comum usada para níveis de pressão sonora é a ponderação A, isto é, $L_P(A)$, medida em dB(A).

Segundo Rossing (1990), outra medida usual de ruídos é o nível de pressão sonora equivalente, $L_{Aeq}$, em decibéis ponderados dB(A), que é definido como o nível em decibéis do ruído estacionário que poderia fornecer a mesma energia total no mesmo intervalo de tempo. Por exemplo, um único pico de 100 dB(A), com duração de 3,6 s é equivalente em energia a um ruído estacionário de 70 dB(A) durante 1 h. A vantagem de usar $L_{Aeq}$ na descrição do ruído é a sua sensibilidade a picos rápidos de ruído, que podem gerar muito incômodo. (ROSSING, 1990:603)

O $L_{Aeq}$ é dado pela equção:

$$L_{Aeq} = 10\ log_{10}\left[\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\frac{P_A^2(t)}{P_o^2}\,dt\right] = 10\ log_{10}\left[\frac{1}{T}\int_t^{t+T}10^{\frac{L_{A(t)}}{10}}(t)dt\right]$$

onde T é o período temporal em segundos, $P_A$ é o nível de pressão sonora instantâneo ponderado em A e $P_o$ é o nível de pressão sonora de referência (20 μPa).

Para que a mensagem chegue ao receptor de maneira clara, isto é, inteligível, é necessário que seja bem pronunciada e que não haja ruídos no ambiente. O tempo de reverberação pode interferir e, se a mensagem for emitida por um auto falante, depende da qualidade deste, bem como da sua posição (distância e direcionalidade).

## RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foram feitas medidas dos $L_{Aeq}$ em alguns locais do Terminal 2 do Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, no Rio de Janeiro:

- Próximo ao desembarque doméstico de passageiros encontramos valores que variaram de 58,7 dB(A) a 65,1 dB(A).
- Próximo ao desembarque internacional medimos valores que variaram de 63,2 dB(A) a 66,6 dB(A). Nesse local os valores mais elevados foram obtidos entre uma escada rolante e uma lanchonete.
- Próximo à porta de saída, que se abre a cada pessoa que sai, foram medidos valores de até 69 dB(A), um pouco mais elevados, devido ao trânsito de carros, bem como ao barulho dos aviões.

As medidas do $L_{Aeq}$ foram feitas com um sonômetro marca Instrutemp, modelo ITDEC 4020, com duração de 10 s.

A região de embarque não possui auto falantes próximos. Há alguns auto falantes na região de embarque, porém a inteligibilidade não é boa. Há algumas mensagens que não são compreendidas, dependendo do local onde esteja a pessoa. Entrevistamos alguns passageiros e funcionários do aeroporto e todos mostraram ter a mesma sensação: muitas vezes não se entende as mensagens e foi observado que dentro do banheiro se entende melhor.

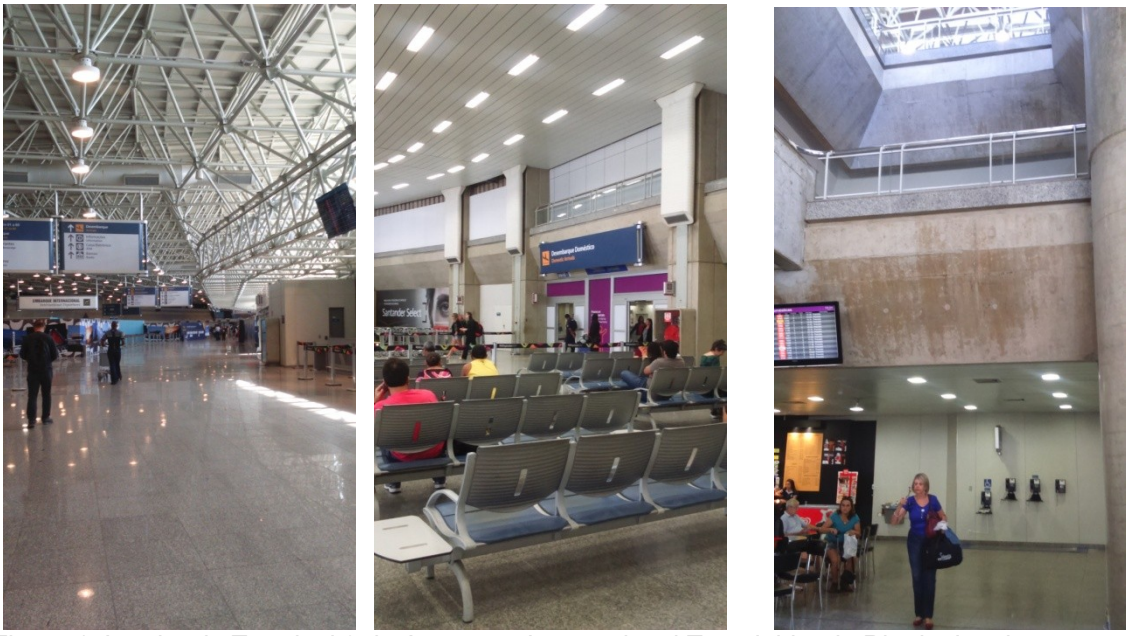


Figura 1: Interior do Terminal 2 do Aeroporto Internacional Tom Jobim do Rio de Janeiro

Na figura 1 vemos três locais do Terminal 2 do Aeroporto Tom Jobim. Os materiais utilizados em alguns revestimentos são bons refletores e a construção possui teto muito elevado, além de algumas regiões ainda mais elevadas que outras. O ambiente é caracterizado por um tempo de reverberação elevado para entendimento de palavras, principalmente se forem pronunciadas rapidamente, o que muitas vezes acontece, dificultando mais se não forem dadas no idioma original dos passageiros.

Nas medidas de níveis de pressão sonora equivalentes encontramos níveis considerados elevados, segundo a NBR 10.152. Como essa norma não considera interiores de aeroportos, comparamos com locais de circulação, portaria e recepção de hotéis e locais de circulação em escolas. Os valores de referência, conforme pode ser visto na tabela 2, são de 45 a 55 dB(A),

bem mais elevados que os valores obtidos. A norma NBR 12.314 de 1997 se refere a interiores de aeroportos, porém com atenção ao isolamento acústico necessário para preservar os passageiros e demais pessoas que ali circulam, dos ruídos dos aviões. Conforme já mencionamos anteriormente, não encontramos esse problema de forma relevante neste aeroporto, uma vez que as portas de saída normalmente estão fechadas e o leve incômodo devido aos aviões só ocorre do lado externo.

Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelos auxílios recebidos.

## REFERÊNCIAS

ABNT, *NBR 10152 - Níveis de ruído para conforto acústico*, válida a partir de março de 1987.

ABNT, NBR 12.314 - *Critérios de ruído para recintos internos nas edificações submetidas ao ruído aeronáutico,* válida a partir de 1997.

AEROPORTO INTERNACIONAL ANTÔNIO CARLOS JOBIM
http://www.aeroportogaleao.net - acesso em 5 de setembro de 2015.

ANIMA ACÚSTICA
http://melhoracustica.com.br - blog - acesso em 1 de setembro de 2015.

INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL, *Manual de Implementação de Aeroportos,* 2004.

PROGRAMA DE INVESTIMENTOS EM LOGÍSTICA: AEROPORTOS
http://www.logisticabrasil.gov.br/aeroportos1 - acesso em 5 de setembro de 2015.

ROSSING, T. D. *The Science of Sound,* Massachusetts: Addison-Wesley publishing Company, 1990.

SILVA, C. M. F. *O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra* - Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade do Porto, julho de 2013.

A4_castella_anunci2_PRINT.pdf 1 11/02/14 12.45

# GIP, Global Insulation Package

*SOLUCIÓN COMPLETA para la medición de aislamiento acústico:*
*MEDICIÓN – CÁLCULOS – INFORME*



## MI006
*Máquina de impactos*




Bluetooth®

## FP122
*Fuente Sonora omnidireccional*




## SC420
*Sonómetro*
*Analizador de espectro*



## SOFTWARE
*Cálculo de Aislamientos*
*CESVA Insulation Studio (CIS)*

*Ayuda a la medición*
*CESVA Measuring Assistant (CMA)*

Incluye
ISO 16283-1

CESVA
NOISE MEASURING INSTRUMENTS SINCE1969

Maracaibo, 6 - 08030 Barcelona (Spain)
T. (34) 934 335 240 info@cesva.com
F. (34) 933 479 310 **www.cesva.com**

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ENSEÑANZA-APRENDIZAJE SOBRE ACUSTICA EN LA CARRERA DE ARQUITECTO: ELECTIVA SONIDO Y HABITAT

PACS: 43.10.Sv

Garzón, Beatriz[1]; Soldati, Elisa[2]; Paterlini, Leonardo[1], Soler Legname, Virginia[2]; Negrete, Jorge[3]
(FAU-SCAIT, UNT - CONICET, MInCyT)[1], (FAU-SCAIT, UNT)[2], (FAU, UNT)[3]
Instituto de Acondicionamiento Ambiental, Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional de Tucumán.
Av. Kirchner 1800. CP 4000 San Miguel de Tucumán. Tel. 0381 – 4364093
sonidoyhabitat@gmail.com

## ABSTRACT

The following issue has as purpose to introduce in a synthetic way the new experience in the teaching – learning process developed in the environmental conditioning about Architectural Acoustic and Soundscape at San Miguel de Tucumán. Each experience takes place in the grade's subject "Sound and Habitat's Elective" from the Environmental Conditioning Institute of the Architecture University of San Miguel de Tucumán, in 2014. The field of the electives includes theorical knowledges and intervention practices on the place, in order to help the student to define features of the graduated professional.

**Palabras clave:** Hábitat Sustentable; Acústica Urbana. Paisaje Sonoro; Acústica Arquitectónica, Concienciación.

## INTRODUCCIÓN

En la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT), las carreras de grado deben ofrecer ámbitos y modalidades de formación teórico-práctica que colaboren en el desarrollo de competencias profesionales. Por lo tanto, asegurará la flexibilidad curricular, promoviendo un diseño auto gestionado del trayecto curricular adaptado a la dinámica de los cambios de la sociedad.

En éste marco se profundizará la formación del alumno en áreas de su elección, ofreciendo oportunidades de aprendizaje y ejercicios que lo capaciten para resolver problemas de orden teórico-práctico en el campo de su elección.

Y, es en este contexto que la oferta de Materias Electivas tiene por objeto: "…Fortalecer áreas de conocimiento, Desarrollar campos de interés particular, Vincular, en una coordinación preestablecida, áreas de conocimiento que puedan articularse con el postgrado, Explorar

temas de vacancia, o no profundizados en el desarrollo de la propuesta curricular obligatoria, Otorgar una orientación especial al perfil del egresado ….".

La Electiva Sonido y Hábitat se enmarca dentro de dicho contexto y busca. "…ahondar y profundizar en los conceptos y aspectos de la acústica desde la perspectiva del quehacer arquitectónico y urbanístico, los que son planteados en forma introductoria en las asignaturas de grado en particular los Acondicionamientos Ambientales…". Problemática que merece un desarrollo de mayor profundidad que habilite a la toma de decisiones en la etapa de diseño, tanto en planteos arquitectónicos de mediana complejidad y su incidencia en el entorno próximo, como también y en intervenciones a nivel urbano. Esta temática se la plantea mediante el desarrollo de actividades que permiten: "…a) Profundizar en el conocimiento de los principios y factores que determinan el comportamiento acústico de los espacios arquitectónicos y los procesos involucrados, b) Adquirir hábitos de análisis, comprobación y valoración de la problemática en la fase de proyecto y alcanzadas una vez culminado el proceso constructivo, c) Conocer y manejar las estrategias de diseño y recursos técnicos para intervenirlos y los métodos y sistemas para la medición, modelación y simulación de casos, d) difundir y transferir los resultados alcanzados..".

Lo aspectos enunciados tienen el propósito de: capacitar al alumno en el manejo de los criterios, instrumentos y sistemas pertinentes para la toma de decisiones y la proposición de alternativas conducente a la reducción del impacto acústico, para poder alcanzar rangos aceptables de confort acústico en diversos espacios en relación a su función y su entorno y concienciar al respecto.

## DESCRIPCION DE LA ASIGNATURA Y SU CONTEXTO CURRICULAR

El Plan de Estudios de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT), se organiza como una estructura tramada compuesta por tres ciclos como estadios formativos, y cuatro áreas de conocimientos, "Comunicación y Forma", "Proyecto y Planeamiento", "Ciencias Básicas, Tecnología, Producción y Gestión" e "Historia y Teoría". Los ciclos son:

- 1° CICLO - GRADO: INTRODUCTORIO - Propedéutico-Holístico. Introductoria al discurso conceptual y metodológico de la carrera. Incluye al 1° nivel (2 semestres)
- 2° CICLO - GRADO: DISCIPLINAR BASICO - Analítico-Conceptual. De apropiación y profundización progresiva y diversificada de los contenidos básicos de la oferta. Desarrolla capacidades básicas de la práctica proyectual. Incluye al 2°, 3° y 4° nivel (6 semestres)
- 3° CICLO - GRADO: DISCIPLINAR SUPERIOR - Sintético-Integrador. De afianzamiento y consolidación relacional y sistémica de los conocimientos avanzados de la carrera. Incluye al 5° nivel (2 semestres).

Las materias Electivas que se dictan en la FAU-UNT cuentan con la aprobación del Honorable Consejo Directivo, organizadas por áreas temáticas y se ubican entre el 3er. y 5to. Nivel de la carrera, teniendo los alumnos que cursar y aprobar 6 Electivas a libre elección entre las que se ofrecen en su Plan de Estudios.

Sonido y Hábitat es una Electiva que se halla en el área de las Ciencias Básicas, Tecnología, Producción y Gestión, con una carga horaria total de 48 hs. y cuyos objetivos son: a) Establecer las causas y efectos de los problemas acústicos, b) Relacionar los mismos para desarrollar soluciones acústicas orientadas a alcanzar el bienestar psicofísico de los habitantes de los espacios, c) Analizar, comparar y aplicar la normativa pertinente, d) Estudiar los métodos normalizados de medición y evaluación acústica, e) Reconocer y manejar instrumental para la evaluación acústica, f) Reconocer y emplear herramientas e instrumentos sencillos de análisis y evaluación de las condiciones acústicas de un local, g) Indagar y desarrollar herramientas, elementos, dispositivos, etc. para la experimentación, demostración y comprobación de los fenómenos y procesos inherentes involucrados, como así también sus similitudes y diferencias,

h) Estudiar propiedades acústicas de materiales y sistemas tecnológicos, tanto tradicionales como novedosos y/o no convencionales, y sus aplicaciones, i) Generar instrumentos y medios para la concienciación, difusión y la transferencia en relación a las problemáticas y soluciones acústicas a nivel urbano y arquitectónico.

**DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO**

Se implementa el modelo "constructivista", el cual plantea que el rol del maestro no es el de transmitir conocimiento solamente, sino el de propiciar los instrumentos para que el alumno lo construya a partir de su saber previo es decir que es una construcción del sujeto.




El conocimiento es una construcción del sujeto

Para el análisis de casos se implementó el método "inductivo" que se basa en la experiencia, en la participación, en los hechos y posibilita en gran medida la generalización y un razonamiento globalizado. Se trabajó en el marco de la "Investigación-Acción Participativa"; metodología que apunta a la "…producción de un conocimiento propositivo y transformador, mediante un proceso de debate, reflexión y construcción colectiva de saberes entre los diferentes actores de un lugar con el fin de lograr la transformación social…".
Los alumnos conformaron equipos de trabajo de entre 4 a 5 integrantes y cada grupo analizó diferentes situaciones; todas ellas, son casos concretos ubicados en el Gran San Miguel de Tucumán, Argentina. Estos casos de estudios fueron debidamente seleccionados para poder realizar en ellos el análisis y detección de los problemas acústicos y, posteriormente, un planteo de soluciones posibles a las problemáticas de cada situación en particular.

Durante su dictado, que se extiende en un cuatrimestre, se prevén diversas actividades, las que contemplan desde exposiciones presenciales, demostraciones y experimentaciones hasta conferencias a través de un Aula virtual con herramientas multimedia. También, se realizan trabajos en campo que incluyen relevamientos, entrevistas a usuarios, reconocimiento de los problemas acústicos del caso en estudio y manejo de herramientas e instrumentos de medición del impacto acústico e instancias de concienciación.


Exposiciones presenciales


Conferencias a través de un Aula virtual

En este proceso de enseñanza-aprendizaje se trabaja también con la modalidad de taller como propuesta de encuentro entre teoría y práctica a través del "aprender-haciendo" y el encuentro

entre grupos para el análisis crítico y la generación de propuestas superadoras; intercambio que permite la retroalimentación de saberes.
La estructura didáctica de las clases presenta el siguiente orden: 1) PRESENTACIÓN de la propuesta de la Electiva. Justificación, Objetivos, Contenidos, Sistema y Régimen de Evaluación. Presentación metodología Investigación-Acción Participativa. Introducción a la Acústica Arquitectónica, 2) INTRODUCCIÓN mediante experimentos audio-perceptivos simples, con el fin de generar interés y despertar la curiosidad en el alumno acerca de la temática. Demostración del movimiento de las ondas sonoras, en un medio elástico con la utilización de un diapasón. 3) CONTAMINACIÓN SONORA. Concepto de ruido y contaminación sonora, presentación de mapas de ruido. Videos explicativos sobre los temas expuestos. 4) CONTAMINACIÓN SONORA Y LOS EFECTOS EN LA SALUD. Concepto, recomendaciones de Organismos Internacionales. Efectos del ruido en las personas. 5) NORMATIVAS. Reglamentaciones vinculadas a la temática en un marco provincial, nacional e internacional. Ley de higiene y seguridad. 6) VIDEOCONFERENCIA. Medición de niveles sonoros, utilización de instrumental. 7) REDUCCIÓN ACÚSTICA. AISLACIÓN ACÚSTICA. Concepto. Reducción por distancia y por pantalla. Estudio de la envolvente, aislación. ABSORCIÓN ACÚSTICA. Tratamiento interno, refuerzo del sonido. 8) VIBRACIONES Y RUIDOS DE IMPACTO. Concepto, ejemplos de soluciones constructivas. 9) LABORATORIOS ACÚSTICOS. Introducción al conocimiento de los laboratorios instalados en el país. Sus instalaciones, equipamiento, actividades.

Otra de las actividades realizadas son los Seminarios internos, encuentros de intercambio, formación y actualización entre el equipo docente de la Electiva y sus colaboradores. Esta herramienta permite desarrollar el estudio profundo sobre determinados temas, socializar la investigación y difundir el conocimiento de los temas. El aprendizaje en un seminario es activo, ya que los participantes deben buscar y elaborar la información en el marco de una colaboración recíproca entre sí y a partir de la interacción con el/los especialistas en el tema.




Seminarios internos.

**RESULTADOS ALCANZADOS**

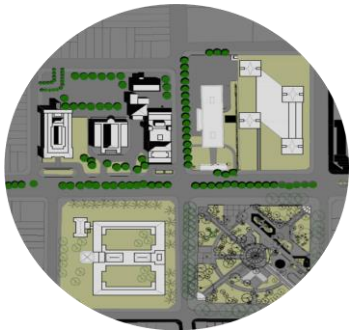
Los grupos de trabajo conformados por los alumnos de la Electiva analizaron casos reales, todos ubicados en San Miguel de Tucumán, destinados a diferentes actividades, entre ellas, bar, heladería, salón de baile y aulas de enseñanza musical. La metodología de trabajo comprendió: a) una descripción de la situación, identificación y evaluación del problema acústico, y b) la elaboración de una propuesta conducente a solucionar total o parcialmente el problema. Es decir que, en cada uno de los casos considerados, se plantearon alternativas que contemplan el abordaje y estudio del problema hasta la generación de soluciones probables para su mejoramiento y la selección de la propuesta superadora.

A) ANALISIS DE CASOS Y PROPUESTAS PARA SU MEJORAMIENTO

1 - ESCUELA DE EDUCACIÓN ARTÍSTICA DE LA PROVINCIA -ESEA-.

Se trata de un edificio educativo que se ubica en el casco céntrico comprendido por las cuatro avenidas, lo que la expone a un flujo intenso de tránsito vehicular. Está conformada por dos niveles en donde se desarrollan las diferentes actividades de enseñanza artística. Análisis de

un Aula de enseñanza de flauta traversa. El aula no presenta ningún tipo de tratamiento acústico.



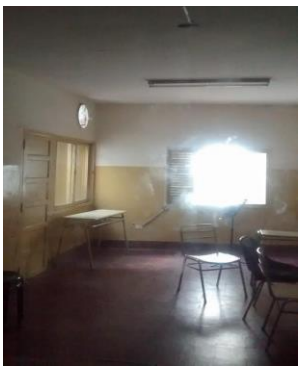
ESEA - Planta



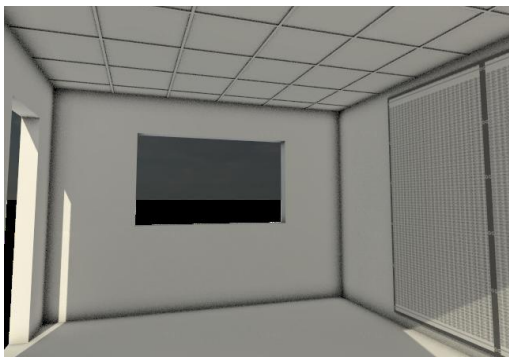
ESEA – Frente

- Identificación del problema: Ruido urbano exterior, circulación vehicular (mayores a 70 db). Ruido proveniente del local adyacente. Circulación de personas en pasillos y escaleras (65 db). Ruidos generados en el local: ventiladores, instrumentos, mobiliario. Elevado TR60

- Planteo de solución: Se plantean soluciones constructivas de modificación de la envolvente para mejorar la aislación respecto de los ruidos provenientes del entorno al aula y respecto del interior se proponen paneles fono-absorbentes cubriendo la superficie necesaria según cálculo para alcanzar valores admisibles de Tiempo de Reverberación para ésta función (TR60med para música de cámara: 1,3 – 1,7seg).



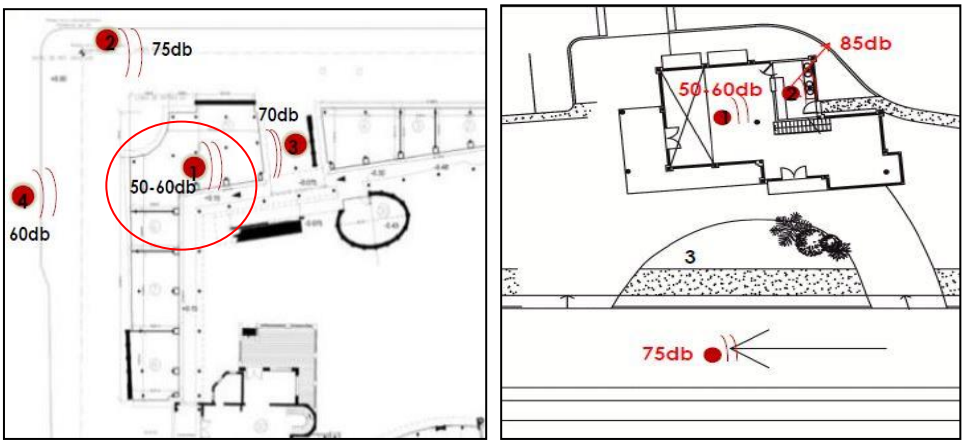
Situación actual – Interior Aula



Propuesta de mejora del Interior Aula 2

2 – BAR - HELADERIA

Este local se encuentra ubicado dentro del centro comercial sobre la Av. Aconquija al 1300, en el municipio de Yerba Buena – Tucumán. Se caracteriza por ser un bar de permanencia y su envolvente presenta grandes superficies vidriadas priorizando las visuales que permite su emplazamiento.




Ubicación - Niveles Sonoros

- Identificación del problema: Elevado ruido de tránsito debido a su ubicación respecto de la avenida Aconquija. Locales contiguos con elevados niveles sonoros. Proximidad entre las mesas del local. Sector de cocina y cafetería cercanas al salón de mesas. Presencia de gran superficie vidriada.
- Planteo de solución: Tratamiento con materiales aislantes en la envolvente. Vidrios laminados. Tratamiento interno del local, cambiando el material del equipamiento (sillas) por otros con mayor coeficiente de absorción. Ubicación de paneles fonoabsorbentes en el cielorraso para mejorar la absorción.



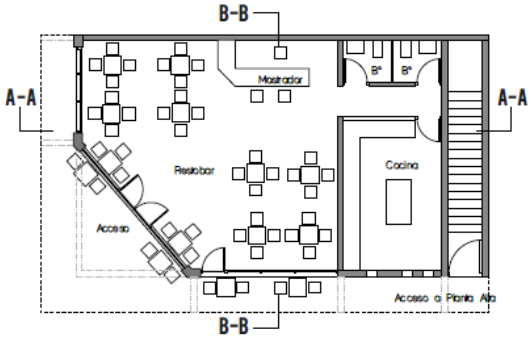
Vistas del interior del local

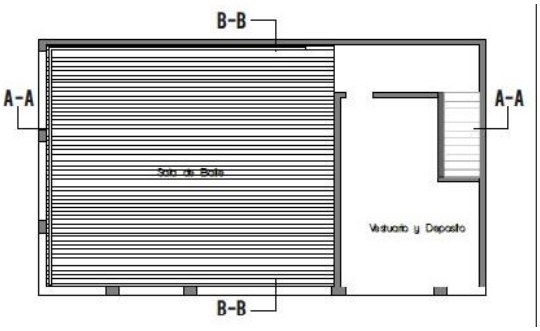


Propuesta de mejorada

3 – SALON DE BAILE – BAR

Se trata de un edificio comercial de dos plantas en esquina, cada una de ellas con funciones diferentes. La Planta Baja alberga un Restobar con frente a las calles San Juan y Virgen de la Merced y la planta Alta se ubica una Escuela de Baile, con aventanamiento a las dos calles mencionadas. Es una construcción tradicional, de estructura de hormigón armado y cerramientos exteriores de ladrillo común macizo con carpinterías metal y vidrio común. .

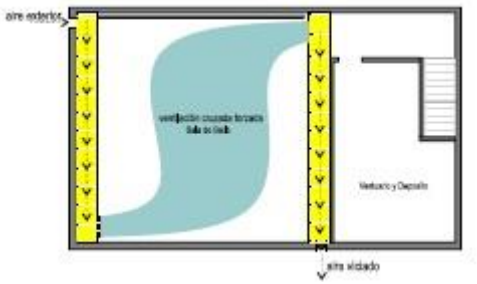


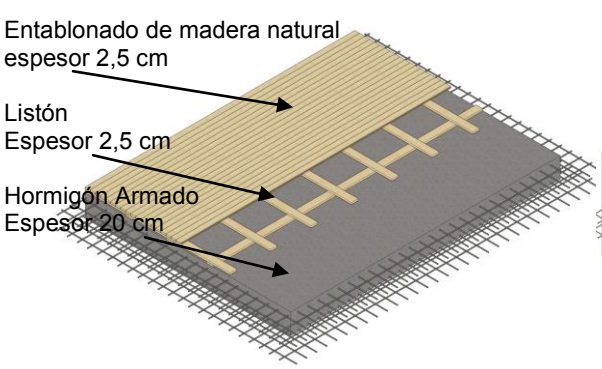

Planta Baja - Bar Planta Alta – Sala de Baile

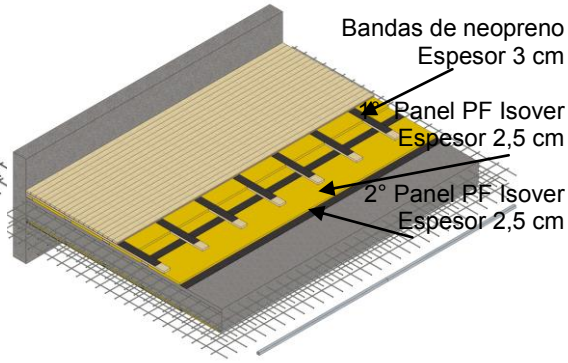
- Identificación del problema. Alto nivel de ruido exterior proveniente del intenso transito vehicular (84 db). Dificultad en el interior por la propia función que dificulta la conversación. Ruido de impacto que se transmite desde la sala de baile del nivel inmediato superior.
- Planteo de solución; Paneles fonoabsorbentes en cielorraso del bar para aumentar la absorción. Mejorar la aislación aumentando la masa de la envolvente con doble vidriado hermético. Propuesta de sistema de ventilación forzada en sala de baile que mejore las condiciones higrotérmicas del local



Detección de problemas Propuesta de mejora higrotérmica-acústica




Solado existente Propuesta para impedir la transmisión de ruido de impacto

CONSIDERACIONES FINALES DE LA ETAPA

Los análisis realizados y las propuestas alcanzadas permitieron enunciar las siguientes consideraciones:

a) Los recintos destinados a bar presentan problemas significativos en cuanto a la reverberación debido a la falta de tratamiento interno adecuado, lo que dificulta la conversación entre sus usuarios.

b) El espacio destinado a baile plantea la problemática de la transmisión de ruido por impacto y de ruidos aéreos hacia el exterior.

c) El aula de enseñanza de música precisan de un tratamiento interior para mantener niveles de TR adecuados a la función y de aislación adecuado, que el local en estudio no presentaba.
d) Los alumnos analizaron y plantearon alternativas de soluciones a cada u a de estas problemáticas acústicas.

B) TRANSFERENCIA Y DIFUSION

La Contaminación Ambiental, particularmente la Contaminación acústica, representa una problemática actual, con gran impacto en los centros urbanos. Organismos Internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que el 76% de la población que vive en los grandes centros urbanos, sufre de un impacto acústico muy superior al recomendable, y esto se refleja en su calidad de vida.

Sus efectos se manifiestan no solamente en nuestro sistema auditivo sino que también provocan afecciones y alteraciones en el organismo en general.

Por esta razón, es necesario crear conciencia de la problemática y así producir un cambio de hábitos de comportamiento tendientes a disminuir en menor o mayor medida la contaminación acústica en su medio ambiente; y como segunda medida, concienciar en el cumplimiento de las normativas vigentes y analizar áreas de vacancia de las normativas al respecto.

En este sentido, se organizaron actividades de difusión y se confeccionó material para las tareas de concienciación y transferencia en el ámbito de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo y del Campus Universitario del Centro Herrera de la Universidad Nacional de Tucumán, mediante la exposición de afiches, folletos, maquetas a escala y/o virtuales y videos explicativos.

CONSIDERACIONES FINALES DE LA ETAPA
Asimismo, con esta actividad se ha logrado: 1) contribuir con aportes a esta problemática, 2) comunicarla a la comunidad toda para abordarla y modificarla y así lograr mayores impactos.




Folletos de Concienciación y Difusión

**CONCLUSIONES**

El abordar casos reales del medio permite al alumno conocer la problemática del medio que lo rodea. Es así que se estudiaron espacios destinados a diversas funciones –bar, heladería, salón de baile, aulas de enseñanza música-. En cada situación, se realiza el relevamiento de los recintos y su entorno inmediato y una evaluación subjetiva con entrevistas a usuario. De esta forma, se pudo detectar la problemática acústica en cada una de las situaciones particulares y, en consecuencia, plantear las soluciones más adecuadas para su adecuación.

Por otro lado y por lo tanto, la lucha contra el ruido precisa de la concienciación y colaboración de cada uno de nosotros y por ello con las acciones desarrolladas al respecto se ha emprendido un camino para “sumar y sumarse al cambio”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Plan de estudios de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT). 2008.
Baschuk, B; Dimarco, S.: Manual de acústica para Arquitectos. Buenos Aires: Espacio Editora.
Burk, W. Manual de medidas de acústica para el control de ruidos. Barcelona: Blume.
Josse, R. La acústica en la construcción, Barcelona: Ed. Gilli.
Vechiatti, N.; Iasi, F.; Muzzio, D. Medición y estimación del aislamiento acústico en edificios. VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2008, Buenos Aires, 2008.
N. Vechiatti, The Dish on Drama Theaters, Absorción sonora en Teatro Colón de Buenos Aires.
Negrete, Jorge. Acondicionamiento acústico en arquitectura; FAU, UNT; 1991.
Negrete, Jorge. Inteligibilidad, medición confección de test. FAU, UNT.
Gonzalo, G. E. Control del Diseño y de la Construcción del Nuevo Anfiteatro del Instituto Superior de Música de la Universidad Nacional de Tucumán. Tucumán, 2010.
Gonzalo, G. Inteligibilidad y aprendizaje: Influencia de la Acústica de las Salas de Clase. 3as. Jornadas de Escuelas Experimentales. Tucumán, 2006.
Iasi, F.; Vechiatti, N. y otros. Measurement and prediction of urban noise spectrum at different heights and distances of the sound source. Cancún, 2010.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# VARIABLES OBJETIVAS Y SUBJETIVAS EN LA EVALUACIÓN DEL RUIDO EN PARQUES Y JARDINES

PACS : 43.50.Rq

Demaria Castañeda, Ignacio; Colorado Aranguren, David; Abad Toribio, Laura; Gabiola Ondarra Francisco Javier.
Grupo de Acústica. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio
Avenida Universidad nº1. 28691 Villanueva de la Cañada. Madrid. España
Tel.: +34 918 105 207
E-mail: idemariac@gmail.com; dcoloara@uax.es; labad@uax.es, fgabond@uax.es

## ABSTRACT

The acoustic pollution appears as an important environmental affair for cities. Noise indexes in a lot of points of the city as parks and gardens are a outstanding information. Urban parks are an isolation urban spaces.
Green areas rating about noise criteria give us a way to analyze acoustic factors.
Acoustic abatement will be investigated because urban parks are composed of multiple elements and coverages including trees, shrubs and pavements, all having a different effect on sound waves.
Loudness and psychological effects have to be consider in noise evaluation in order to improve acoustical quality into parks.

## RESUMEN

El ruido se configura como un agente contaminante de primer orden. El conocimiento de los niveles de ruido en los diferentes puntos de la ciudad resulta una información relevante, en especial dentro de los parques y jardines, considerados como espacios de aislamiento dentro de la trama urbana.
La clasificación de las zonas verdes conforme a criterios acústicos nos permitirá analizar los factores que implican que estos espacios dispongan de unos menores niveles de ruido que los de su entorno. Los fenómenos de atenuación acústica y el comportamiento de las ondas sonoras en el interior de los parques se encuentran vinculados a diversas variables como la presencia de árboles, arbustos y pavimentos, que pueden ser gestionadas.
Igualmente, es preciso analizar la sonoridad y el grado de percepción de los niveles de ruido por parte de los usuarios de estos espacios, para con todo ello, poder adoptar las medidas necesarias en aras de mejorar la calidad acústica de las zonas verdes.

## 1.- METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RUIDO EN LOS PARQUES Y JARDINES

La evaluación de los niveles de inmisión acústica en exteriores lleva aparejada la necesidad de incorporar una visión global del fenómeno del ruido, puesto que en cualquier punto en el que se efectúe una medición, inciden sonidos que provienen de diversos tipos de fuentes (fijas y móviles), que se propagan en todas direcciones y cuyas intensidades oscilan en función de momentos temporales asociados a un uso más o menos intenso del espacio circundante.

Por tanto, hay que incorporar toda esta casuística y abordar el análisis desde un punto de vista integral, teniendo en cuenta dichos condicionantes.

Con este marco de actuación, el proceso de evaluación del ruido ambiental se realizó en diversos parques y jardines de la ciudad de Ávila, llevando asociada tres fases. La primera corresponde a lo que podemos denominar como un inventario de focos, que correspondieron a 28 zonas verdes de titularidad pública. La segunda consistió en la programación de un plan de muestreos, y la última en la toma de los datos experimentales en campo de la inmisión acústica, que se corresponde con el nivel sonoro que se recibe en el centroide del parque. Dicho punto fue utilizado como referencia para la caracterización acústica de la zona verde, y que es la contribución de las distintas fuentes sonoras (focos de ruido ambiental en exteriores) como se ha indicado anteriormente.

El período de mediciones establecido fue de un año natural, con lo que se obtuvo información en las diversas estaciones, vinculado a sus distintas condiciones meteorológicas, junto con los diferentes niveles de intensidad de uso de los parques y jardines.

Se consideró en esta selección de puntos el factor condicionante que incorporan los parques y jardines en los fenómenos de atenuación acústica, por lo que se buscó una superficie mínima de 3000 $m^2$.Así mismo fue preciso tener en cuenta unas dimensiones y distancias mínimas, a partir de las cuales se pueden registrar efectos significativos. En este sentido, fueron excluidos los jardines de carácter lineal, caso de las medianas.

Estos criterios geométricos nos permiten evaluar la presión sonora en un punto lo suficientemente alejado de los focos emisores, en este caso de la red viaria de la ciudad y de las líneas de ferrocarril, en el que las mediciones puedan verse afectadas por la incidencia de la estructura y composición de la zona verde, en cuanto a la tipología de superficies (terrizos, pavimentos duros, areneros, etc.) y elementos vegetales, tales como céspedes, árboles o arbustos.

Las mediciones en el interior de los parques nos aportan información condicionada por las propias características de diseño del mismo, orográficas, condiciones atmosféricas en el momento de la toma de datos, etc. las cuales hay que tener en consideración, al igual que la propia ubicación de los elementos receptores, junto con las características de la fuente (puntual o lineal) en asociación a una escala temporal vinculado a la diferente intensidad de uso por parte de los ciudadanos de esa zona verde [1].

El procedimiento de toma de datos en los diferentes puntos a muestrear se basó en las determinaciones establecidas por el Anexo IV del RD 1367/2007 de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003 del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Las medidas fueron realizadas por un sonómetro integrador Cesva sobre un trípode que permite situar el instrumental a una altura de 1,5 m sobre el nivel del suelo, determinando el nivel continuo equivalente ($L_{eq}$) durante 15´ en el centroide del polígono que conforma el parque.

La realización de diversas series de medidas sirvió para establecer los niveles de inmisión en el punto de evaluación, las cuales fueron planificadas de modo sistemático, permitiendo minimizar

posibles efectos ocasionales, y de este modo ser representativo en una escala temporal amplia, cubriendo todos los meses del año, diarios y festivos para los 28 puntos.

Para ello se procedió a la medición durante un año completo (2014), todos los días de la semana y a diferentes horas, siempre dentro del rango de trabajo del período "day", entre las 9:00h y las 19:00h.

Tabla 1. Número de mediciones por mes

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ENERO | 48 | MAYO | 52 | SEPTIEMBRE | 57 |
| FEBRERO | 36 | JUNIO | 50 | OCTUBRE | 37 |
| MARZO | 41 | JULIO | 38 | NOVIEMBRE | 55 |
| ABRIL | 37 | AGOSTO | 50 | DICIEMBRE | 31 |

Se estableció como objetivo el registro de 19 mediciones por zona verde, un total de 532 en el conjunto de los parques y jardines, alcanzándose los 7980 minutos en el global del estudio. De esta manera se podrá abordar el análisis de un amplio abanico de franjas horarias, junto con los diferentes días de la semana, que atenúen los efectos aleatorios o anómalos que pudieran producirse.

## 2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS PARQUES Y JARDINES POR CRITERIOS DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA REGISTRADA

Conforme a la metodología aplicada se procedió a la determinación de los niveles de ruido en cada uno de los parques evaluados a través del cálculo de la media de los registros. En primer lugar se deduce que los niveles acústicos existentes en los parques abulenses pueden caracterizarse como bajos, con un valor promedio de 49,03 dBA, si lo comparamos con los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud, donde se indica que *"entorno a los 45 dBA nos encontramos en un denominado clima agradable"*. El mismo organismo indica que por encima de los 55 dBA puede empezar a haber molestias en la población, llegando a un máximo admisible de 65 dBA.

Por lo tanto, las zonas verdes presentan unos confortables niveles acústicos frente al resto de espacios urbanos (teniendo en consideración los datos del Mapa del Ruido [2] vigente), no alcanzándose en ninguno de ellos ni siquiera la cifra de los 60 dBA.

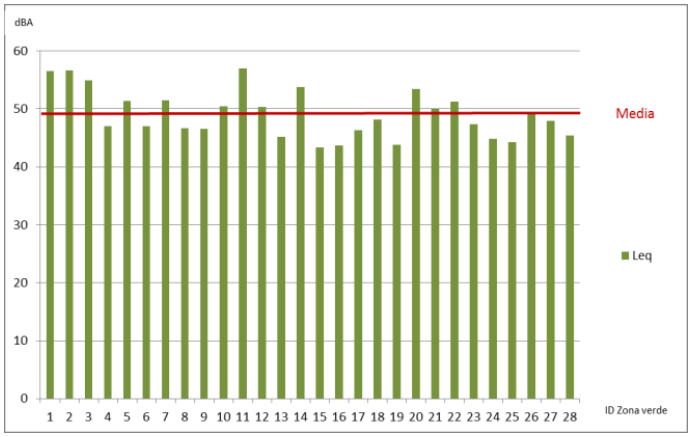



Gráfico 1. Niveles de ruido registrados en las zonas verdes. $L_{eq}$

Conforme a ella podemos destacar que los espacios de mayor confort acústico, es decir, los espacios poco ruidosos, suponen el 27,7% de las zonas evaluadas.

Los parques y jardines que podemos catalogar como más ruidosos, serían los que superan el umbral de 50 dBA, suponiendo el 39,29% del total analizados, destacando dentro de ellas algunos parques con valores por encima incluso de los 55 dBA, los cuales suponen el 10% del total, constituido por 3 zonas verdes, la Puerta de Santa Teresa, El Rastro y el parque de San Vicente.

Tabla 2. Zonas verdes con valores de ruido por encima de la media

| ID | Denominación | $L_{eq}$ (dBA) |
|---|---|---|
| 10 | El Recreo | 50,44 |
| 22 | Juan Pablo II | 51,24 |
| 5 | Canteros | 51,34 |
| 7 | Pinar de San Antonio | 51,40 |
| 20 | Carretera Burgohondo | 53,37 |
| 14 | Patrimonio de la Humanidad | 53,73 |
| 3 | Avenida de Madrid | 54,83 |
| 1 | Puerta de Santa Teresa | 56,52 |
| 2 | Paseo del Rastro | 56,61 |
| 11 | San Vicente | 56,91 |

La principal característica en común de dichas zonas más ruidosas es su localización en el centro urbano, anexas a las murallas, una variable física que puede generar reflexiones de las ondas sonoras que contribuyen a generar un incremento en la presión acústica registrada. De igual modo, disponen en sus inmediaciones de un parking subterráneo, lo que incrementa el flujo de tráfico en el entorno, el cual se erige como la principal variable, desde el punto de vista posicional, en la generación de ruido y por consiguiente, en la caracterización de la zona verde como más o menos ruidosa.

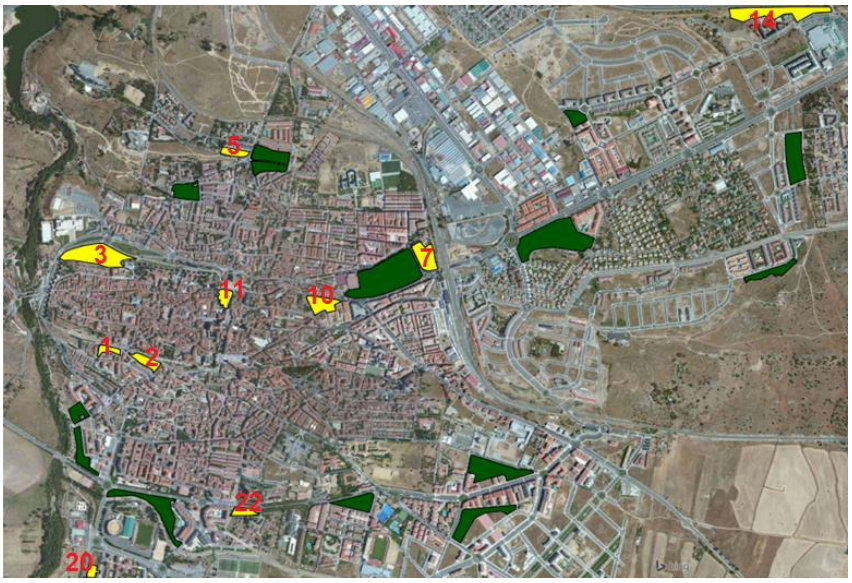



Figura 1. Localización de las 10 zonas verdes más ruidosas de la ciudad.

El valor máximo de San Vicente, con una media de 56,91 dBA respecto a las 19 mediciones efectuadas en él, se localiza en una zona que actúa como la entrada principal al casco histórico de Ávila, y en especial, constituye la vía de acceso al parking de la Plaza de Santa Teresa, el cual destaca por ser uno de los más concurridos de la ciudad. A pesar de su composición estructural, con un 44,34% de cobertura de árboles y arbustos, los altos niveles de presión

sonora de su entorno implican que en su interior no se alcancen unos óptimos grados de confort acústico, asociado al elevado ruido de fondo.

Las mediciones han cubierto todos los meses del año por lo que se dispone de una gran cantidad de registros con los que podemos analizar la incidencia del mes, día de la semana o franja horaria, en los niveles de ruido en dichos espacios. Para ello se han seleccionado los 2 valores máximos registrados en cada zona verde en la toma de datos, de los que se deduce que los meses que se presentan unos mayores niveles de ruido son los del período estival (de Julio a Septiembre).

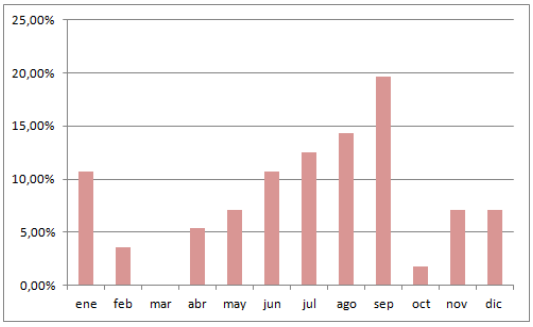



Gráfico 2. Análisis de máximos registros según el mes del año.

Si analizamos la incidencia del día de la semana, no se infiere ningún resultado representativo, pues los fines de semana, que a priori pudieran tener afección en los datos, presentan un comportamiento similar al los días de diario. Los martes y viernes con un 23,2% aparecen como los que manifiestan unos mayores niveles de ruido, muy cerca del 21,4% de los domingos.

Por tanto, los parques y jardines de la ciudad de Ávila se pueden caracterizar como espacios poco ruidosos, donde los ubicados cerca de las principales vías de comunicación registran los mayores valores, siendo el período estival, vinculado al buen tiempo, el que registra unos niveles de ruido más elevados, asociado al uso de los parques y jardines por parte de los ciudadanos.

## 3.- VARIABLES OBJETIVAS DE INCIDEN EN LOS NIVELES DE RUIDO REGISTRADO

Los niveles de ruido registrados en el interior de los parques y jardines están relacionados con diversas variables existentes en ellos, la localización y distribución de elementos vegetales, coberturas y superficies de céspedes, caminos, etc. además de las tradicionalmente evaluadas, caso de la presencia de obstáculos, tanto artificiales como de origen natural, que pueden provocar alteraciones en la propagación de las ondas sonoras, junto con la topografía del terreno.

Desde este punto de vista, la vinculación de las áreas más o menos ruidosas con la composición de elementos del parque, tiene unas variables objetivas identificables en relación a los fenómenos de atenuación del sonido que se observan en el interior de estos espacios.

La comparación de datos del centroide, con la información derivada del Mapa de Ruido respecto a los valores resultantes del plan de mediciones efectuado, ponen de manifiesto la influencia de las diferentes coberturas en la variación de los decibelios registrados [1].

En estas 28 zonas se constata que existe una dispar distribución de coberturas, con distintas proporciones respecto al área total. No obstante, si tenemos en cuenta la diferencia entre los datos de la cartografía temática con el valor registrado, las superficies compuestas por árboles y arbustos muestran su importancia en los fenómenos de atenuación acústica.

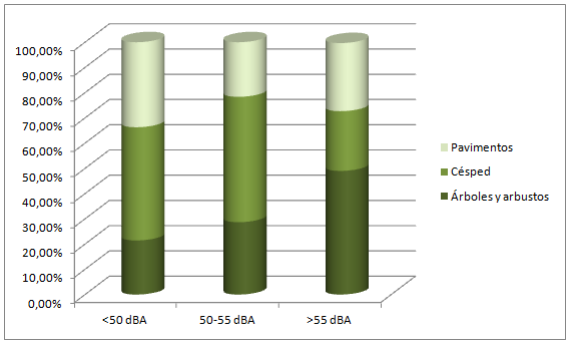



Gráfico 3. Correspondencia del promedio de coberturas conforme a los niveles de ruido registrados

Por tanto, la caracterización acústica de las zonas verdes lleva coaligada muchas variables que a su vez están vinculadas entre sí, como la vegetación y el suelo, junto con los diferentes condicionantes asociados a factores exteriores, como la cercanía a los principales ejes de comunicación o la presión poblacional del barrio en el que se localizan.

Es por ello que los árboles, arbustos, céspedes, junto con los diferentes tipos de pavimentos, se presentan como variables que inciden en los fenómenos de atenuación sonora en el interior de las zonas verdes. Estas variables, inicialmente, no son tan determinantes a la hora de categorizar los niveles acústicos de una zona verde en su conjunto, puesto que factores exteriores como la intensidad de tráfico, adquieren una relevancia crucial como valor inicial de referencia, donde las zonas verdes actúan como grandes barreras acústicas integrales, para reducir el nivel de ruido en el centroide de los espacios verdes frente a su periferia. Es ahí precisamente donde estas variables sí tienen incidencia, es decir en la capacidad atenuadora del sonido en el interior de los parques y jardines.

## 4.- ANÁLISIS DE LA PERCEPCIÓN DE RUIDO

Las variables subjetivas constituyen un nuevo punto de vista a la evaluación del ruido desde la óptica de la percepción de la molestia. Por tanto, se hace preciso incorporar a la caracterización acústica de los parques y jardines, un estudio de la incidencia o relevancia que tiene el ruido en los usuarios de las zonas verdes frente a otros factores.

En esta línea, nos encontramos con dos conceptos diferentes pero relacionados, como es la onda sonora como fenómeno físico y por otro la sonoridad, entendida como sensación subjetiva producida por las variaciones de presión en el aparato auditivo. La sonoridad es una característica subjetiva de la percepción del ruido y numerosas investigaciones han permitido tabular un conjunto de curvas de igual sonoridad (tablas de Munson&Fletcher) [3].

A medida que aumenta el nivel de presión sonora las curvas se hacen más planas, es decir, la dependencia de la frecuencia es menor conforme que aumenta el nivel de ruido.

Sobre esta base, para el análisis de la variable subjetiva del ruido se realizado una encuesta sobre 75 usuarios de los parques y jardines, con el objeto de conocer el grado de importancia que tiene el confort acústico existente frente a otras variables como los equipamientos, la limpieza o la calidad de la vegetación, y de este modo valorar el nivel de percepción que los usuarios tienen sobre este fenómeno.

La encuesta tuvo lugar en los meses de Junio y Julio de 2015 en los parques de San Antonio, Hervencias, El Recreo, Camino Gansino y Joaquín Rodrigo, localizados uniformemente por toda la ciudad, en período de mañana y tarde, a lo largo de todos los días de la semana. El 72% de los encuestados residían en el barrio, con un tiempo de estancia mayoritario de más de

una hora (56%), con una frecuencia de visitas en general baja, donde el 64% manifiesta una periodicidad inferior a 2 veces por semana.

Se consideraron 3 grupos de edad, menores de 40 años, entre 40-60 y mayores de 60, el nivel de afluencia, la residencia en la zona, el tiempo de estancia y la visibilidad existente respecto al tráfico rodado en el punto donde se efectuó la encuesta.

Uno de los resultados más relevantes es la baja valoración que se le da al ruido por parte de los usuarios de las zonas verdes, donde factores como la calidad de la vegetación o la limpieza, se manifiestan como los más importantes para los ciudadanos. Si tenemos en cuenta los grupos de edad, es la población de mayor edad la que otorga más relevancia al factor acústico.

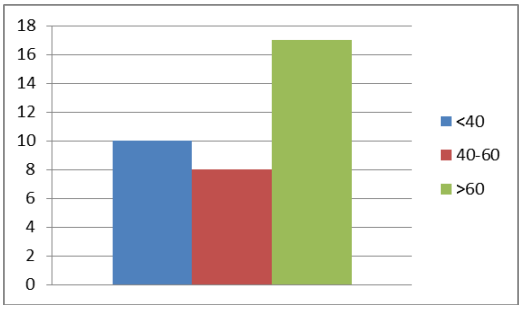



Gráfico 4. Importancia del ruido según los grupos de edad

Por tanto, el grupo de más de 60 años tiene una capacidad de percepción del ruido mayor, situando a éste como el segundo factor principal a la hora de seleccionar un parque, detrás de la limpieza, frente al resto de grupos de edad, donde la calidad de la vegetación se posiciona como el aspecto dominante, seguido de la limpieza.

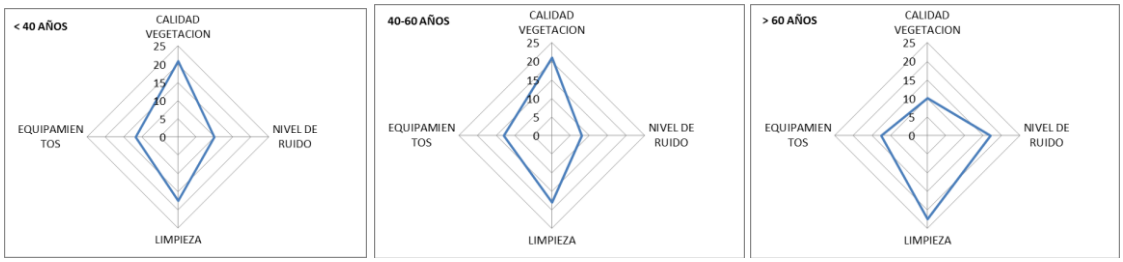



Gráfico 5. Valoración de factores por grupos de edad

Respecto a los ciudadanos más asiduos a la visita de las zonas verdes, es la limpieza el factor más importante para ellos, quedando el ruido en un cuarto lugar.

Finalmente se analizó la incidencia en la percepción del ruido teniendo en cuenta la visibilidad o no del foco, puesto que en algunos de los parques era posible ver el tráfico de las calles colindantes desde su interior, por lo que pudiera existir una sugestión que tuviera repercusión. Los resultados ponen claramente de manifiesto el incremento de la importancia del ruido en las estas zonas, pudiendo constatar que el efecto de barrera visual que los elementos vegetales suponen provocan una alteración en la percepción del ruido, independientemente de los decibelios que se registran en ese parque, y desligado de los propios efectos atenuadores que las barreras vegetales generan [4].

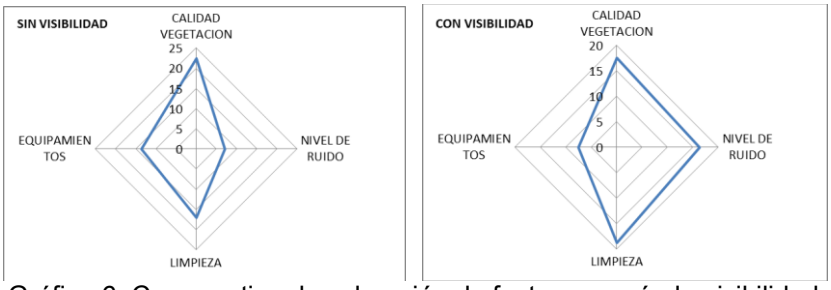



Gráfico 6. Comparativa de valoración de factores según la visibilidad

Por tanto, el ruido no es adecuadamente valorado como un factor relevante para los usuarios de los parques y jardines de la ciudad de Ávila, destacando su importancia cuando existen un contacto visual con el foco o fuente del ruido.

## 5.- CONCLUSIONES

El presente artículo ha puesto manifiesto que aún queda mucho por hacer en el campo de la acústica ambiental en exteriores, al estar influenciado por un gran número de variables, vinculadas a la propagación del sonido (geométricos, condiciones meteorológicas, suelo, obstáculos, tipología de la vegetación, densidades, etc.) difícilmente controlables.

La necesidad de aportar información acústica sobre las zonas verdes, como espacios clave en la vertebración de la trama urbana ligado a su alta intensidad de uso por parte de los ciudadanos, se presenta como capital en una sociedad donde la información ambiental gana en importancia, y donde los niveles de ruido en los parques han sido desestimados hasta la fecha. Existen numerosos estudios desde hace décadas, que abordan la incidencia de factores como los diferentes elementos constitutivos de los parques (árboles, tipo de pavimento, etc.) para poder analizar sus repercusiones en la propagación del sonido. Por ello, es preciso considerar las múltiples variables existentes en estos espacios, para lo que se hace necesario un completo plan de muestreos a lo largo de un período prolongado de tiempo.

La composición de las zonas verdes a través de superficies de árboles, arbustos y pavimentos, generan fenómenos de atenuación acústica que tiene repercusiones sobre los niveles de ruido existentes en el interior de los parques y jardines.

Por otro lado, el ruido puede ser analizado desde el punto de vista subjetivo de la percepción a través del concepto de la sonoridad, donde el fenómeno de la visibilidad emerge como el factor principal a la hora de valorar el ruido. Las medidas encaminadas a la ocultación de la fuente, acompañadas de otras de carácter físico, pueden contribuir a la mejora objetiva y subjetiva del confort acústico en las zonas verdes.

## REFERENCIAS

[1] Demaria, I. Evaluación de la calidad acústica en los grandes parques urbanos. Ponencia Tecni-Acústica. 2014.

[2] http://www.avila.es/areas-destacadas/urbanismo/item Mapa Estratégico del Ruido de la ciudad de Ávila. Datos de niveles sonoros y cartografía. 2012

[3] Brand, T. Effect of Hearing Loss, Centre Frequency, and Bandwidth on the Shape of Loudness Functions in Categorical Loudness Scaling. International Journal of Audiology, Vol. 40. Oldenburg University. 2001

[4] Cataño, G.R. Eficiencia de una cobertura arbórea como barrera atenuadora del ruido vehicular. Universidad Nacional de Colombia. 2005.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONSIDERACIONES PARA EL CONFORT ACÚSTICO EN LAS PERSONAS CON TRASTORNOS DEL ESPECTRO AUTISTA

PACS: 43.55.Fw

Daumal i Domènech, Francesc; Martín Fanjul, Valentín
Escola Tècnica Superior d´Arquitectura de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
Campus Diagonal Sud, Edifici A
Av. Diagonal, 649
08028 Barcelona
Tel/Fax: (+34)934016387 / (+34)934016426
Email: francesc.daumal@upc.edu / vmf@coac.net

## ABSTRACT

The acoustic comfort in spaces for people from the autism spectrum is essential, the ear is the most influential sense to understanding the world around them meaning. The complexity and lack of disorder, due to its severity, irreversibility, permanence and its ability to regression in the progress they can achieve the individual requires specific formal and technical solutions to facilitate their relationship with the environments in which they develop their daily life.

Keywords: autism, ASD, acoustic, architecture, neurophysiology, hypersensitivity, hyposensitivity.

## RESUMEN

El confort acústico en los espacios destinados a personas pertenecientes al espectro autista es imprescindible, el oído es el sentido más influyente para la comprensión del mundo que les rodea. La complejidad y el desconocimiento del trastorno, debido a su gravedad, irreversibilidad, permanencia y su capacidad de regresión en los avances que pueda lograr el individuo, requiere de soluciones formales y técnicas específicas, para facilitar su relación con los entornos en los que desarrollan su vida cotidiana.

Palabras clave: autismo, TEA, acústica, arquitectura, neurofisiología, hipersensibilidad, hiposensibilidad.

## INTRODUCCIÓN

El termino autismo fue empleado por primera vez por el psiquiatra Eugene Bleuler, pero la existencia del autismo en el campo de la psicología es aún muy reciente en comparación con otros síndromes, los comienzos se remontan a L. Kanner (1943) que fue el primero en diferenciarlo de la esquizofrenia.

Dentro del trastorno del espectro autista se incluyen el trastorno autista, el síndrome de Asperger, el trastorno desintegrativo infantil y los trastornos generalizados del desarrollo no específicos, cuyos síntomas principales se engloban dentro de los ámbitos socio-comunicativo y de las conductas repetitivas.

La bibliografía, tanto en el terreno de la psicología como en el de la medicina, es constante y existen numerosos grupos de investigación. Los estudios en el ámbito de la arquitectura son más limitados.

Existen bastantes estudios, aun no se conoce suficientemente los procesos físicos y sus consecuencias en las personas con TEA, por lo que es necesario profundizar en el conocimiento de los mismos.

No todas las personas pertenecientes al espectro autista tienen la misma sintomatología, existen diferentes grupos de comportamientos para la recepción e interpretación de los sonidos.

En la arquitectura el conocimiento radica principalmente en la descripción de la experiencia de los arquitectos en la realización de espacios específicos y en muy pocas ocasiones en la experimentación directa con grupos de control En las referencias bibliográficas que se muestran en este texto, que no son exclusivamente dedicados a la acústica arquitectónica, se mencionan algunas características que deberían tener estos entornos.

Desde la arquitectura hay numerosos obstáculos para obtener información válida para su aplicación práctica, ya sea por la dificultad en la comunicación con las personas con TEA o en otros casos por la complejidad de acceso a los centros específicos, debido a los derechos legales de privacidad de sus usuarios.

En la realización de nuevos estudios, desde la perspectiva de la arquitectura, hay que potenciar la comunicación entre los responsables de los centros específicos existentes, debido a su clara vinculación con el trastorno, pudiendo facilitar valiosa información a los técnicos que quieren profundizar en el conocimiento de esta área.

El estudio de la acústica en la arquitectura, para los usuarios pertenecientes al espectro autista, es imprescindible, el oído es el sentido, junto al tacto, más afectado, según las investigaciones realizadas.

Conocer los avances en otras ramas de la ciencia, que no sean exclusivamente la arquitectura, permitirá saber con mayor precisión las características de estos espacios para que gocen de unas cualidades de confort acústico adecuadas y también para saber si las recomendaciones existentes emitidas por profesionales vinculados a la creación de estos espacios son correctas.

No obstante, como se podrá comprobar, existen aun bastantes contradicciones en los resultados obtenidos de los estudios científicos de las personas con TEA, debido a la gran complejidad y diversidad del síndrome, lo que dificulta la aplicación de soluciones generalizadas, encontramos casos desde la hipersensibilidad acústica hasta la hiposensibilidad e incluso casos mixtos dependiendo del tipo de sonido.

## ASPECTOS NEUROFISIOLÓGICOS

Desde la medicina y la psicología, y en concreto en la neurofisiología, se han realizado diversos estudios en el ámbito del autismo, especialmente vinculados a los aspectos acústicos y sensoriales, algunos de los cuales serán comentados brevemente, para poder entender mejor el proceso de percepción sensorial de las personas pertenecientes al espectro autista, también denominadas como TEA.

Rosenhall, Nordin, Sandström, Ahlsén y Gillberg (1999) en su estudio con 199 personas, que se desarrolló durante un periodo de doce años, concluyeron que la pérdida auditiva severa tiene una prevalencia del 3,5%, siendo diez veces superior a los estudios epidemiológicos realizados en la población en general. La hiperacusia, que es la sensación dolorosa ante los sonidos cotidianos, es un síndrome sumamente generalizado, así como la otitis media, debido a la existencia de anomalías anatómicas.

Gomot, Giard, Adrien, Barthelemy y Bruneau (2002) generan la posibilidad de que los niños autistas puedan detectar los cambios acústicos de manera más rápida que los que no lo son, debido a una mayor reactividad cerebral, la cual puede estar vinculada con la alteración de la síntesis de la serotonina en la corteza frontal y en el tálamo izquierdo.

Bruneau, Bonnet-Brilhault, Gomot, Adrien y Barthélémy (2003) en sus pruebas intentaron cuantificar la sensibilidad excesiva, insuficiente o selectiva al sonido, obteniendo resultados demasiado heterogéneos, por lo que recomiendan realizar los estudios por separado.

Khalfa, Bruneau, Rogé, Georgieff, Venillet, Adrien, Barthélémy y Collet (2004) afirman la existencia de deficiencias en los procesos auditivos, mostrando patrones de asimetría auditiva en la cóclea, por lo que se generan alteraciones atípicas en la reactividad auditiva de las personas pertenecientes al espectro autista, además de una considerable disminución de la sensibilidad acústica con el aumento de la edad, por lo que no son homogéneas las características auditivas a lo largo de la vida.

Tharpe, Bess, Sladen, Schissel, Couch y Schery (2006) sostienen que las pruebas auditivas convencionales no son apropiadas para las personas con autismo. La presencia de hiposensibilidad en algunas personas pertenecientes al espectro autista no es debido a causas físicas, ya que en los casos estudiados, tienen una función auditiva normal, pudiendo estar estos problemas vinculados a un déficit de atención o de interpretación, pero no de recepción por motivos fisiológicos.

Gomot, Bernard, Davis, Belmonte, Ashwin, Bullmore y Baron-Cohen (2006) demostraron una activación anormal, de algunas regiones del cerebro, involucradas en la atención involuntaria de los acontecimientos auditivos del entorno de las personas autistas. La dificultad para la interpretación de los sonidos entrantes, puede ser la causa de la tendencia a ignorar nuevos estímulos auditivos cuando estos se producen fuera del estímulo principal de atención, motivo por el que produce una deficiente adaptación a los cambios sensoriales presentes en el entorno.

Nieto (2008) indica que las anomalías en la percepción auditiva deberían estar necesariamente incluidas en los criterios para el diagnóstico del autismo, siendo la causa más probable de las deficiencias o dificultades presentes en el lenguaje de las personas pertenecientes al espectro autista.

Gomes, Pedroso y Wagner (2008) buscan el origen de la hipersensibilidad acústica en las personas con TEA y los diagnósticos erróneos como sordos, en algún momento de la vida de los autistas, al no responder a los interlocutores cercanos, pero por el contrario reaccionaban de manera dolorosa a algunos tipos de sonidos.

Marco, Hinkley, Hill y Nagarajan (2011) trabajan la hipótesis de las diferencias en el proceso sensorial de las personas pertenecientes al espectro autista, pudiendo ser la causa de los retrasos en el lenguaje, también advierten de las dificultades y contradicciones con las que se encuentra la neurociencia debido a la heterogeneidad del trastorno.

Haesen, Boets y Wagemans (2011) sugieren que las personas con autismo tienen un procesamiento más focalizado en sonidos puros, motivo por el cual no responden adecuadamente al lenguaje.

Takahashi, Nakahashi, Komatsu, Ogino, Iida y Kamio (2014) en varias pruebas realizadas comprobaron que las personas con TEA respondieron con mayor intensidad a los estímulos acústicos débiles, mientras que para los estímulos acústicos fuertes su comportamiento no fue significativamente mayor que para los grupos de control que no pertenecían al espectro autista.

Ludlow, Mohr, Whitmore, Garagni, Pulvermüller y Gutierrez (2014) relatan que la discriminación auditiva en los niños con autismo se realiza mediante un proceso diferente a aquellos que no lo tienen, centrándose en el tono del habla, pero no en el significado de las palabras, careciendo de los automatismos de atención a los sonidos que se generan próximos a su ubicación.

Lin, Kashino, Ohta, Yamada, Tani, Watanabe, Kanai, Ohno, Takayama, Iwanami y Kato (2014) en un experimento con 13 adultos neurotípicos y 16 sujetos con TEA, a los cuales se les aplicó oxitocina vía nasal, comprobaron que en ambos grupos se mejoraba la diferenciación entre sonidos humanos y sonidos no humanos.

Manning, Tibber, Charman, Dakin y Pellicano (2015) en su estudio con 33 niños con autismo y otros 33 niños neurotípicos, con edades entre los 6 y los 13 años, sometiéndoles a una serie de pruebas ante la pantalla de un ordenador. Concluyeron que los niños pertenecientes al espectro autista son capaces de captar mejor el movimiento pero tienen mayor dificultad para discriminar estímulos, lo que les supone una saturación por exceso de información, dificultando la adecuada recepción e interpretación de los sonidos.

## ASPECTOS ARQUITECTÓNICOS

En la arquitectura se han centrado los esfuerzos en estudiar los efectos de la hiperacusia en las personas pertenecientes al espectro autista y en la creación de espacios específicos que favorezcan la adaptación de sus usuarios a la realidad cotidiana de las personas con TEA.

Del conocimiento existente podemos percibir, como se indica en la bibliografía aquí desarrollada, que la acústica es el factor más determinante a la hora de adaptar los espacios a las necesidades de las personas pertenecientes al espectro autista, lo que no significa que no se deban de tratar otros aspectos sensoriales.

A continuación se realiza una breve descripción de los aspectos más interesantes en la utilización de la acústica arquitectónica, que podemos encontrar en la bibliografía especializada, realizada en su gran mayoría por arquitectos que han tenido experiencias prácticas en el desarrollo de construcciones vinculadas a personas pertenecientes al espectro autista.

Riba y Marrón (1986) indican que ante la aparente sordera selectiva que padecen, es necesaria la realización de espacios específicos para la estimulación de las personas pertenecientes al espectro autista, evitando las distracciones, para que se puedan generar estímulos puros, con una clara misión pedagógica.

Beaver (2006) hace referencia a la necesidad de evitar materiales excesivamente pulidos, ya que su comportamiento acústico puede ser problemático al favorecer las reflexiones y refracciones de las ondas sonoras, generando distorsiones en los entornos, perjudicando por lo tanto el confort acústico.

Whitehurst (2006) realiza una serie de recomendaciones, basadas en la experiencia práctica, sobre el tipo de suelos o techos más adecuados y sus resultados una vez utilizados en estos ámbitos.

Vogel (2008) describe una serie de aspectos específicos del diseño de espacios interiores para adaptar los espacios a las personas con autismo, como no emplear iluminaciones artificiales mediante fluorescentes y tampoco los ventiladores o equipos de aire acondicionado, así se evita la presencia de ruidos molestos, que dificulten la concentración de las personas con trastornos del espectro autista.

Mostafa (2008) mediante su estudio práctico demuestra que el control acústico de los espacios para personas autistas mejora los procesos de aprendizaje y favorece el desarrollo de sus habilidades. Afirma que la acústica es el factor más influyente para la adecuación de los espacios arquitectónicos. También considera la necesidad de conferir características específicas a los sitios en función de su uso, que pueden ir desde la insonorización hasta la estimulación acústica.

Humphreys (2008) recomienda la utilización de cubiertas con acabado vegetal para limitar el impacto sonoro de la lluvia y aumentar la masa de los cerramientos para favorecer la absorción acústica, además de limitar el número de materiales diferentes empleados para el desarrollo de los recintos.

Tufvesson y Tufvesson (2009) aconsejan la entrada a los espacios por un único acceso, así se evitan las distracciones sonoras, también hay que considerar que son los enclaves de mayor dificultad para su aislamiento acústico, también recomiendan el control acústico de los recintos.

Scott (2009) comenta aplicaciones prácticas realizadas en sus trabajos, como la creación de una barrera acústica en las zonas de una edificación más expuestas al ruido exterior o el especial cuidado a la hora de aislar las aulas, explicando brevemente las soluciones constructivas empleadas.

McAllister (2010) comprobó en sus estudios que los diferentes tipos de ruidos tienen desigual impacto en las personas con TEA. También recomienda la buena acústica de los espacios y evitar en su interior la existencia de ruidos repentinos, favoreciendo de esa manera la concentración y focalización de los sonidos.

Daumal y Martín (2014) analizan las diferentes terapias con componentes acústicos aplicados a las personas pertenecientes al espectro autista y su posible inclusión en los programas funcionales de los centros específicos. La eficacia de estos tratamientos no está demostrada totalmente científicamente, pero en caso de su aplicación, detallan una serie de recomendaciones técnicas basadas en la bibliografía existente para la adecuada utilización de estos espacios.

Mostafa (2014) en otro de sus textos considera que las mejoras en las características acústicas de los edificios también deben de estar en función de la gravedad del síndrome en el usuario autista, favoreciendo desplazamientos interiores graduales de los mismos hacia espacios acústicos convencionales, limitando los ámbitos insonorizados, destinándolos exclusivamente para situaciones extremas en el comportamiento de la personas con TEA, impidiendo que se autolesionen.

**DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Destacando algunos resultados de la investigación descritos anteriormente en los aspectos neurofisiológicos podemos señalar los siguientes:

- Posibilidad de que las personas con TEA puedan detectar los cambios acústicos de manera más rápida.
- La activación anormal de algunas regiones del cerebro dificultan la interpretación de los sonidos entrantes.
- Se centran más en los sonidos puros por lo que tienen dificultades en el lenguaje.
- Responden de manera más acusada a los estímulos acústicos débiles.
- La discriminación auditiva es diferente a las personas que no pertenecen al trastorno del espectro autista.

Desde la experiencia de la arquitectura se señalan las siguientes consideraciones acústicas:

- Evitar las distracciones en los espacios específicos.
- Características particulares en función de los usos, desde la insonorización hasta la estimulación acústica.
- No utilizar materiales pulidos para evitar las reflexiones y refracciones de las ondas acústicas.
- Aislar individualmente los espacios para evitar contaminaciones sonoras de actividades próximas, potenciando el control acústico impidiendo la presencia de sonidos no previstos.

Como se puede comprobar por la cronología de la bibliografía, brevemente desarrollada en este documento, no siempre los descubrimientos neurofisiológicos han sido anteriores a los conocimientos adquiridos por la observación y posterior desarrollo de espacios específicos.

También implica que los conocimientos son complementarios y que se está en el camino correcto ya que los resultados y aplicaciones de ambas ramas del conocimiento no son contradictorios, promoviendo la mejora constante del confort acústico de las personas pertenecientes al espectro autista y por lo tanto facilitando su adaptación al entorno.

La geometría de los espacios, la relación y la organización entre los mismos, así como las propiedades físicas de los materiales que se emplean en los procesos constructivos, son fundamentales para la adecuada concepción formal de estos espacios específicos.

Tampoco se pueden olvidar las características del medio en el que se propagan las ondas sonoras, es decir, la presión, temperatura, densidad y humedad del aire existente en el interior de los recintos, por lo cual es también necesario el análisis de estos factores ambientales.

Por ejemplo, la velocidad del sonido, a mayor temperatura del espacio por el que se transmite, implica que se desplace con mayor rapidez, incrementando la dificultad para la focalización y comprensión de los sonidos en las personas con TEA.

Los estudios neurofisiológicos demuestran la existencia de diferencias entre las personas autistas, las cuales tienen consecuencias en la interpretación auditiva y en la expresión sonora, en el caso de que esta se produzca, dificultando la posibilidad de establecer reglas generales en el diseño.

Podemos concluir, que la acústica es el factor más determinante a la hora de adaptar los espacios o crear nuevos para las personas pertenecientes al espectro autista, lo que no significa que no se deban de tratar otros aspectos sensoriales, por ello el estudio del confort acústico permitirá una mejor adaptación de las personas con TEA a su entorno más cercano.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Beaver, C. (2006) Designing environments for children and adults with autistic spectrum disorder. Paper presented to International Conference on Autism, CapeTown.

- Bruneau, N., Bonnet-Brilhaut, F., Gomot, M., Adrien, J. y Barthélémy, C. (2003). Cortical auditory processing and communication in children with autism: electrophysiological/behavioral relations. International Journal of Psychophysiology 51 (2003) 17–25.

- Daumal, F. y Martín, V. (2014). Terapias acústicas en los trastornos del espectro autista: Aspectos del programa funcional para el desarrollo de centros específicos. Congreso Tecniacústica 2014, Murcia. (pp. 452-459). Madrid: Sociedad española de Acústica (SEA).

- Gomes, E., Pedroso, F. y Wagner, M. (2008). Hipersensibilidade auditiva no transtorno do espectro autístico. Pró-Fono Revista de Atualização Científica. Out-dez; 20(4):279-84.

- Gomot, M., Bernard, F. A., Davis, M. H., Belmonte, M. K., Ashwin, C., Bullmore, E. T., et al. (2006). Change detection in children with autism: an auditory event-related fMRI study. Neuroimage, 29(2), 475-484.

- Gomot, M., Giard, M. H., Adrien, J. L., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2002). Hypersensitivity to acoustic change in children with autism: electrophysiological evidence of left frontal cortex dysfunction. Psychophysiology, 39(5), 577-584.

- Haesen, B., Boets, B. y Wagemans, J. (2011) A review of behavioural and electrophysiological studies on auditory processing and speech percepcion in autism spectrum disorders. Research in Autism Spectrum Disorders, 5 (2011) 701-714.

-Humphreys, S. (2008). Architecture and Autism. Obtenido de http://www.auctores.be/auctores_bestanden/UDDA%2003102008%20S%20Humphreys.pdf

- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact, Nervous child. 2(2): 217-230

- Khalfa, S., Bruneau, N., Roge, B., Georgieff, N., Veuillet, E., Adrien, J. L., et al. (2004). Increased perception of loudness in autism. Hearing Research, 198(1-2), 87-92.

- Lin, I., Kashino, M., Ohta, H., Yamada, T., Tani, M., Watanabe, H., Kanai, C., Ohno, T., Takayama, Y., Iwanami, A. y Kato, N. (2014). The effect of intranasal oxytocin versus placebo treatment on the autonomic responses to human sounds in autism: a single-blind, randomized, placebo-controlled, crossover design study. Molecular Autism 2014, 5, 20.

- Ludlow, A., Mohr, B., Whitmore, A., Garagnani, M., Pulvermüller, F. y Gutierrez, R. (2014) Auditory processing and sensory behaviours in children with autism spectrum disorders as revealed by mismatch negativity. Elsevier, Brain and Cognition , 86, 55-63.

- Manning, C., Tibber, M., Charman, T., Dakin, S. y Pellicano, E. (2015). Motion Integration Is Enhanced in Autism. The Journal of Neuroscience, May 6, 35.

- Marco, E., Hinkley, L., Hill, S., y Nagarajan, S. (2011). Sensory Procesing in Autism: A review of Neurophysiologic Findings. Pediatric Reserch, 69(5), 48-54.

- Martín, V. y Daumal, F. (2015). Arquitectura y Autismo: Aspectos de la investigación en el medio acústico. I Jornadas de Investigación y Doctorado: Calidad y Acreditación. Ciencias Politécnicas nº 78 - 26/6/2015. Universidad Católica San Antonio de Murcia.

- Martín, V. y Daumal, F. (2015). Consideraciones médicas y psicológicas, aplicadas a la acústica, en los espacios para personas con trastornos del espectro autista. I Jornadas Doctorales de la Universidad de Murcia. Escuela Internacional de Doctorado (EIDUM). 28 y 29 de Abril 2015.

- McAllister, K. (2010). The ASD Friendly Classroom – Design Complexity, Challenge & Characteristics. 1-18. Research Society International Conference 2010, Montreal, Canada.

- Mostafa, M. (2008). An Architecture for Autism: Concepts of Design Intervention for the Autistic User. International Journal of Architectural Research, 2(1), 189-211.
- Mostafa, M. (2014). An Architecture for Autism: Autism Aspects in School Design. International Journal of Architectural Research, 8(1), 143-158.

- Nieto del Rincón, P.L. (2008) Autism: Alterations in Auditory Percepcion. Reviews in the Neurosciences, 19, 61-78.

- Riba, J. y Marrón, M. (1986). Problemàtica Arquitectònica de l´assistència a la persona autista. Fundació Tutelar Congost Autisme (Ed), Autisme realitat o mite. (pp.169-191). Barcelona: Cerac-Apafacc.

- Rosenhall, U., Nordin, V., Sandström, M., Ahlsén, G. y Gillberg, C. (1999). Autism and hearing loss. Journal of Autism and Developmental Disorders, Vol. 29, No. 5.

- Takahashi, H., Nakahashi, T., Komatsu, S., Ogino, K., Iida, Y. y Kamio, Y. (2014). Hyperreactivity to weak acoustic stimuli and prolonged acoustic startle latency in children with autism spectrum disorders. Molecular Autism 2014, 5:23.

- Scott, I. (2009). Designing learning spaces for children on the autism spectrum. Good Autism Practice. 10(1), 36-59.

- Tharpe, A. M., Bess, F. H., Sladen, D. P., Schissel, H., Couch, S., & Schery, T. (2006). Auditory characteristics of children with autism. Ear and Hearing, 27(4), 430-441.

- Tufvesson, C. y Tufvesson, J. (2009). The building process as a tool towards an all inclusive school: a Swedish example focusing on children with defined concentration difficulties such as ADHD, autism and Down's syndrome. Journal of Housing and the Built Environment, 24, 47–66.

- Vogel, C.L. (2008). Classroom design for living and learning with autism. Autism Asperger's Digest. May-June.

- Whitehurst, T. (2006). Evaluation of features specific to an ASD designed living accommodation. Sunfield School: Sunfield Research Instutute.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# USO DEL CONTRASTE ACÚSTICO PARA EVALUAR LA MOLESTIA PERCIBIDA POR EL RUIDO

PACS: 43.50.Qp

Robert Barti
Asesor y consultor acústico
RBD acoustic engineering
Calle La vinya, 32 Atico
08041 Barcelona. España
Tl: + 34 619 983 384
E-mail: robert@rbd.com

**RESUMEN**

La falta de vocabulario específico, nos impide poder describir con palabras como es el ruido que nos molesta. La psicoacústica aporta herramientas potentes que pueden cuantificar los aspectos cualitativos del ruido, pero no resuelven el problema de cuantificar la molestia percibida. Si las personas somos capaces de valorar de forma subjetiva la molestia, de una forma relativamente rápida, se podría hacer lo mismo de forma objetiva? La experiencia demuestra que en acústica, la solución más compleja, no siempre es la mejor. En este artículo se describe el contraste acústico también llamado emersión acústica. Conceptualmente es muy simple: se basa en el fenómeno bien conocido por el que un ruido con muchos desniveles es en general considerado más molesto que un ruido de nivel casi-constante. Este sencillo indicador permite valorar el grado de molestia de una forma simple sin precisar de instrumentación específica ni de cálculos complejos.

**ABSTRACT**

The lack of specific vocabulary, prevents us from being able to describe in words how is the noise that bothers us. Psychoacoustics provides powerful tools that can quantify the qualitative aspects of noise, but do not solve the problem of quantifying the perceived discomfort or perceived nuisance. If people are able to assess discomfort subjectively, relatively quickly, the same could be done objectively? Experience shows that in acoustics, the more complex solution is not always the best one. This paper describes the acoustic contrast, also called acoustic rise. Conceptually it"s very simple: it"s based on well-known phenomenon whereby a noise with many fluctuations is generally considered more annoying than the sound of near-constant level. This indicator assesses the degree of discomfort in a simple manner without requiring specific instrumentation or complex calculations.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para evaluar la afectación que el ruido produce sobre las personas, se realizan mediciones sonométricas. En principio todas estas mediciones, deberían poder valorar el grado de afectación del ruido. Diversos trabajos de investigación, confirman que existe una correlación clara entre el nivel de molestia percibido y el nivel de presión sonora expresado en dB(A), para niveles superiores a los 60 dB(A) aproximadamente. Para los niveles de presión acústica elevados, no existen problemas con el límite inferior de medida de los equipos. Sin embargo éste problema puede darse con facilidad en las mediciones de presión sonora en ambiente interior, donde el nivel

de ruido suele ser bastante bajo, normalmente por debajo de los 30 dB(A). En estos casos se constata que no existe una relación clara entre el grado de molestia y el nivel de presión sonora expresado en dB(A), por lo que las mediciones sonométricas que se realizan, no valoran adecuadamente la molestia generada por el ruido percibido. Para corregir estas deficiencias, se recurre a añadir unos factores de corrección, partiendo eso si, del nivel global en dB(A), que tienen por objetivo matizar el resultado obtenido en base a: la presencia de componentes de baja frecuencia, la presencia de componentes tonales, y la presencia de componentes impulsivas.

**2. QUE ASPECTOS DEL RUIDO CAUSAN MÁS MOLESTIA?**

Para responder a esta pregunta, hay que especificar qué situación se considera. No es lo mismo estar en ambiente exterior que en ambiente interior, independientemente del nivel de ruido, ya que la presencia de objetos más cercanos influye en nuestro sistema de percepción. En ambiente interior, las estructuras, el tiempo de reverberación, las reflexiones, etc. pueden matizar las sensaciones percibidas, mientras que en espacio abierto en general prevalece el campo directo procedente de la fuente o fuentes de ruido.

La proximidad de un sonido, en general conlleva un mayor grado de alerta, lo cual a su vez causa una mayor alteración. Este efecto es consecuencia de la función natural del oído, que esencialmente nos alerta de lo que acontece a nuestro alrededor, complementando en ocasiones a la visión. Como es sabido, no se puede desconectar el oído, éste siempre trabaja, las 24 h los 365 días del año. De noche cuando la visión no es útil, es cuando el sonido adquiere mayor relevancia. Escuchar un ligero chasquido cerca de nosotros nos puede generar inquietud por querer saber de qué se trata. Para que ese sonido sea perceptible mientras estamos durmiendo, debe superar el ruido de fondo suficientemente como para despertarnos. El grado de superación dependerá de la fase de sueño en la que se está y del individuo. En general la decisión de si un ruido molesta o no, no requiere mucho tiempo, y siempre se hace en base al ruido que nos rodea en ese momento, y al tipo de actividad que deseamos o estamos realizando. Si ese ruido interfiere en nuestra tarea, se considerará molesto. (Berglund 1995).

Todas estas sensaciones matizan en gran medida la valoración de molestia o no de un ruido. En ambiente interior la presencia de objetos y estructuras cercanas, junto con la proximidad de personas ajenas, propician la aparición de estos ruidos. Los ruidos procedentes del exterior, generalmente quedan fuertemente coloreados por el aislamiento acústico de las estructuras, dominando siempre las bajas frecuencias, en los niveles de inmisión interior. En cambio en espacio abierto (en entorno urbano), por lo general, la valoración suele ser más dependiente del nivel sonoro sin efectos de proximidad. Los sonidos, a pesar de la mayor atenuación de las altas frecuencias, son más equilibrados que los niveles de inmisión en ambiente interior. En éste trabajo nos centraremos en los niveles de ruido inferiores a los 40 dB(A) y en ambiente interior.

El ruido o sonido, tiene diferentes aspectos físicos que se pueden medir y por tanto cuantificar. Los más básicos son:

- El nivel de presión acústica global (sea ponderado o no).
- La distribución espectral del ruido.

La presión acústica generalmente se promedia energéticamente, por lo que a mayor presión acústica, generalmente mayor molestia. Los niveles de presión acústica medidos, suelen integrarse durante un tiempo, dependiendo de la variabilidad de la fuente sonora. Es bien conocido que ante fuentes con mucha variabilidad de nivel, el resultado obtenido de la integración temporal, no refleja el grado de molestia. Hay diversos ejemplos cotidianos: el camión de recogida de basura, el paso de una moto ruidosa, un perro que ladra, etc. En todos estos casos el evento es considerado de corta duración su aparición en una medida de 5 minutos en período nocturno, puede alterar notablemente los niveles de presión obtenidos, pero en un promediado más largo su influencia será despreciable. El hecho de que unas personas se han despertado durante la noche a causa del ruido, no queda reflejado en una medición con un grado de integración elevado.

La distribución energética por bandas (octava o tercios) aportan una información cualitativa de la distribución espectral de la energía acústica. Si la energía se centra en las bandas centrales,

alrededor a los 2 KHz, el sonido será muy molesto, ya que a esas frecuencias el oído presenta su máxima sensibilidad. Si la misma energía se centra en las bajas frecuencias, la sensación producida será muy distinta. (Mouret, Vallet 1998)

Sin embargo tanto el nivel de presión acústica global, como su distribución espectral, no permiten explicar porqué una persona puede dormir plácidamente sentado en un incómodo asiento de un avión con un nivel de ruido de 85 dB(A), mientras que esa misma persona no puede conciliar el sueño cómodamente en su cama, con su pijama, con un ruido de 28 dB(A). El grado de molestia en ambiente interior, no depende únicamente del nivel de presión sonora, o del espectro de frecuencia del ruido, hay algo más.

Para que un ruido sea perceptible por el oído, debe ser audible, y además éste debe superar al ruido ambiente. Cuanto más destaque sobre el ruido ambiente, éste puede ser más perceptible, y hay una mayor probabilidad de que resulte molesto, sobre todo si éste interfiere en nuestra tarea, por ejemplo dormir.

En este trabajo no se trata de valorar los niveles de ruido percibido en función de la superación o no de los límites establecidos por la legislación vigente, sino de valorar el grado de molestia generado por dichos ruidos sobre la población, para encontrar un indicador que sea sensible a éste parámetro.

**3. PORQUE UN SONIDO MOLESTA Y OTRO NO?.**

Hay muchas causas. En general el concepto molestia debe ligarse al impedimento o dificultad para realizar alguna tarea concreta. Una misma fuente de ruido puede producir distinta reacción sobre las personas en función de la acción que se esté realizando. Tal es el caso de escuchar una música, o una locución mientras se realizan determinadas tareas. Ese ruido puede resultar molesto, y eso de forma independiente al nivel sonoro. Un ejemplo bien conocido es el fenómeno del “estacionamiento de un vehículo”. Esta tarea, requiere la coordinación de muchos movimientos, y precisa además de un cálculo de distancias, giro de volante, etc. para evitar colisionar con otros vehículos. Para realizar todas estas tareas, nuestro cerebro utiliza gran parte de la potencia de cálculo de que dispone. Se dice entonces que “nos concentramos” en la tarea de aparcar. Resulta curioso pero cierto, que si en el momento de estacionar tenemos la radio o música conectados, instintivamente, procederemos a apagar el sonido, porque nos distrae. Se hace realidad aquella frase: “callarse que no veo”. Lo mismo ocurre si estamos conduciendo y estamos muy pendientes del tráfico, buscando una calle. Si alguien pretende dialogar con nosotros en ese momento, no podremos escuchar y entender lo que dice, sin dejar de prestar atención a la circulación, y eso en ocasiones conlleva algún disgusto. Quizás en un futuro no muy lejano, veamos los coches con los conductores solos, para que nada ni nadie los distraiga.

Algo similar ocurre cuando se escucha música y se está leyendo o estudiando. Realmente, no podemos “centrar” la atención en dos cosas distintas de forma simultánea, o leemos o escuchamos la música. Nuestro cerebro no puede realizar dos tareas distintas que requieran potencia de cálculo o concentración. Los estudiantes que escuchan la música mientras estudian, tapan el ruido de fondo para evitar distracciones. Es decir la música les permite concentrarse en su tarea. Curiosamente una determinada canción puede ser agradable escucharla, y si nos gusta mucho, probablemente no nos moleste aunque el nivel sonoro sea elevado. Esa misma canción reproducida unas horas más tarde en período nocturno cuando queremos dormir, es probable que entonces nos resulte molesta.

El cerebro es capaz de realizar potentes funciones que le permiten identificar patrones o sonidos. Esto sucede con la voz de una persona. A pesar de que el canal de comunicación no sea perfecto (telefonía, ruido ambiente, etc.), podemos reconocer quien nos habla con relativa facilidad. El reconocimiento o búsqueda de un patrón, es sin duda uno de los efectos más devastadores de cara a la percepción de la molestia. La identificación del ritmo musical hace que la persona no pueda conciliar el sueño hasta que la fuente cesa su actividad o la persona se duerma por agotamiento. En estos casos el cerebro está “esperando” el siguiente ‘bum’ del ritmo musical.

Cuando no se percibe, por el cambio de canción o de ritmo, el cerebro “busca” rápidamente el nuevo patrón. Eso produce la sensación sobre las personas afectadas de que el ruido “se le mete en la cabeza”. En general los ruidos de baja frecuencia son los causantes de este fenómeno, y dada su difícil localización o procedencia dentro de una sala, a veces se confunde con fenómenos vibratorios. Todos estos fenómenos se producen por el efecto de memoria o experiencia acumulada del cerebro. Nótese que un sonido familiar no genera tanta alarma como un sonido nuevo. Sucede lo mismo con un sonido constante o casi constante en amplitud o intensidad, respecto de otros sonidos con una mayor variación en su intensidad. Estos últimos se consideran más molestos. Se puede observar pues, que la molestia de un ruido es una cuestión muy subjetiva que no depende únicamente del nivel sonoro absoluto sino de los desniveles.

## 4. EL CONFORT ACÚSTICO.

El concepto de confort acústico tiene una amplia aplicación en la construcción, donde se da a entender que el ruido procedente de otras estancias o del exterior, está muy controlado, y además el tiempo de reverberación esta también tratado. Para la construcción, quizás sería más adecuado hablar de la calidad del ambiente sonoro, puesto que en la construcción se crean espacios, generalmente cerrados, donde se disfruta de un determinado ambiente propiciado por los revestimientos, las dimensiones de la sala, y el aislamiento acústico respecto los distintos focos sonoros.

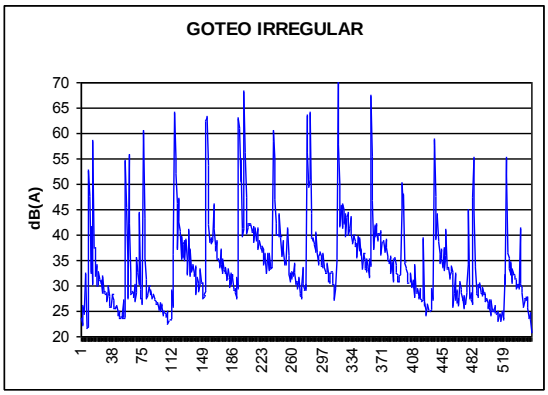
El concepto de confort acústico es más adecuado usarlo para describir las propiedades cualitativas que el sonido puede producir. El confort acústico se basa en dos aspectos: la calidad y cantidad de energía acústica radiada. El confort acústico tiene su influencia sobre la calidad del trabajo, del sueño, etc. Cuando la calidad del ambiente sonoro se deteriora, se observan efectos negativos como la baja productividad, los conflictos vecinales, y en casos muy graves llegando a problemas psicológicos. Así pues podemos hablar del confort acústico que un sonido produce sobre las personas. No debe confundirse con la calidad acústica de un sonido, donde mediante indicadores psicoacústicos, se trata de cuantificar los aspectos cualitativos de un sonido. Distintos trabajos (Vallet et Al. 2000, Hiramatsu 2000, Ouis 2002) muestran que las personas moderadamente expuestas al ruido, en general se quejan mucho más que otras expuestas a niveles de ruido superiores y que supuestamente deberían quejarse mas. Parece que los elevados niveles de contaminación acústica en algunas zonas, conllevan un cierto grado de “resignación” por parte de los afectados, que lo atribuyen a una situación “normal”. Ciertamente, los niveles de ruido cerca de las vías de comunicación con densidades de circulación elevadas, producen menor molestia que las personas expuestas al ruido discontinuo de un cruce regulado con semáforo. (Barti 1995).

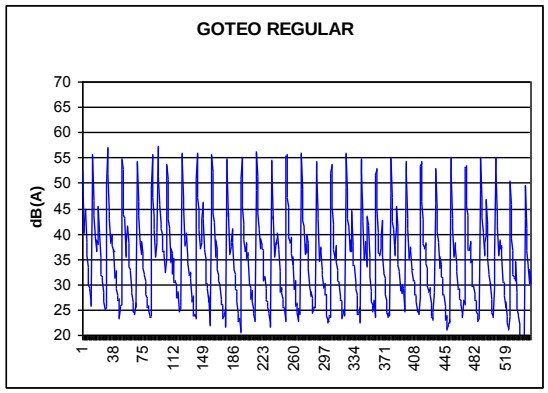
## 5. CONTRASTE ACÚSTICO.

El contraste de una imagen es la distancia entre los valores más oscuros y los más luminosos. Una imagen en blanco y negro sería la más contrastada, puesto que no hay grises. En acústica, no podemos “ver” el sonido, y por tanto perdemos esa capacidad de referenciar un nivel con otro. Notemos que para comparar sonidos no se pueden superponer éstos, ya que se crearía un nuevo sonido. No obstante en acústica tenemos dos conceptos similares: El nivel de inmisión, y el nivel de ruido ambiente. Las distintas fuentes de ruido se producen en diferentes momentos y diferentes lugares. Por ejemplo en la cocina existen diversos utensilios que producen diferentes niveles de ruido. La nevera y el lavavajillas suelen producir niveles bajos de ruido, mientras que una batidora o una trituradora, suelen hacer niveles de ruido muy superiores. Independientemente del utensilio considerado, se podría definir un ruido ambiente esperado dentro de una cocina. El tiempo de funcionamiento es también otro factor a tener en cuenta. La duración de un vuelo comercial, suele ser muy superior al del tiempo en hacer una mayonesa o triturar una carne, por ejemplo. Se analiza pues los desniveles que una fuente de ruido produce sobre su entorno más inmediato.

El contraste acústico tiene a su vez dos variantes: El contraste global o por bandas de frecuencia. De cara a valorar el grado de molestia de forma sencilla, se opta por el contraste de nivel global, por dar un único resultado, dejando el contraste espectral para posteriores estudios. Como se trata de cuantificar los desniveles sonoros entre el ruido producido por la fuente sonora y el ruido ambiente, no se utiliza el Leq, puesto que con su integración “elimina” justamente las oscilaciones

o variaciones de nivel que es lo que se pretende encontrar. Se recurre a los percentiles. Inicialmente L10 y L90, que tradicionalmente se han usado para mostrar los niveles más elevados y los más bajos. Los “máximos” de señal viene dados por el L10, mientras que el ruido de fondo o ambiente sería el L90. Tras varias pruebas con señales con desniveles apreciables se comprueba que el indicador L5 ofrece unos mejores resultados, puesto que se acerca más a los niveles más elevados especialmente en señales con notables oscilaciones. Es el caso del goteo de un grifo, donde la frecuencia del goteo y su intensidad varían. Las siguientes gráficas muestran un fragmento de la señal temporal con la misma duración, para el goteo irregular y el goteo regular.




Los percentiles L5, L10 y L90 obtenidos en cada caso, se resumen en las tablas siguientes.

| Goteo irregular | |
|---|---|
| L5 | 53,0 |
| L10 | 44,4 |
| L90 | 27,5 |

| Goteo regular | |
|---|---|
| L5 | 53,8 |
| L10 | 50,3 |
| L90 | 29,2 |

Vemos que para el caso del goteo irregular, el percentil L5 refleja mejor las oscilaciones de nivel generado. Por este motivo se escoge el percentil L5 para la formulación del contraste.

El contraste acústico se define pues como:

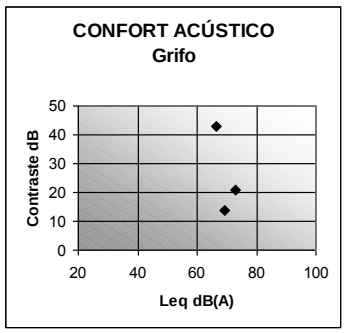
Contraste acústico (C) = L5 – L90  dB

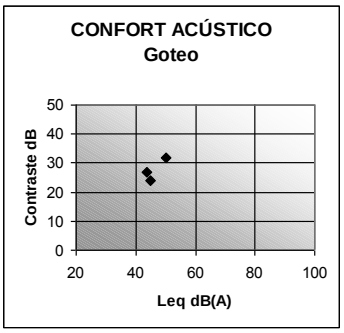
**6. PRUEBAS REALIZADAS.**

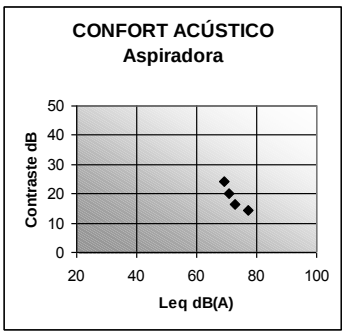
Para estudiar el comportamiento de este indicador, se graban sobre un soporte digital a través de un sonómetro de precisión, los sonidos de distintas fuentes sonoras corrientes a las que podemos estar expuestos. El uso del sonómetro nos permite saber los niveles sonoros con precisión. Se realiza un post-procesado de los registros, obteniendo diversos indicadores. Se hace un estudio estadístico, un análisis espectral, y un análisis de sonoridad usando el método de Zwicker. Las fuentes de ruido seleccionadas son de uso corriente o de situaciones y entornos habituales. Concretamente se han seleccionado el sonido de: aspiradora, grifo, goteo, descarga cisterna WC, utensilios de cocina, ruido de tráfico, secador de pelo, ruido en dormitorio, ruido de paseo, ruido en interior de vuelo comercial, ruido interior de bares y restaurantes (sin música), ruido de lluvia, ruido de lavadora, ruido de máquinas industriales (radial, sierra eléctrica, martillo neumático, etc.) y ruido de despertador. Todos estos sonidos se han grabado en las posiciones habituales en que se encuentra una persona respecto a la fuente de ruido. Las muestras de ruido reflejan las condiciones normales de uso o funcionamiento. Se han grabado un total de 72 fuentes de ruido.

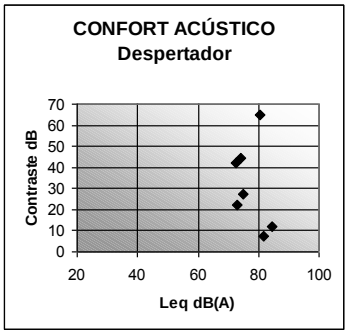
**7. RESULTADOS OBTENIDOS.**

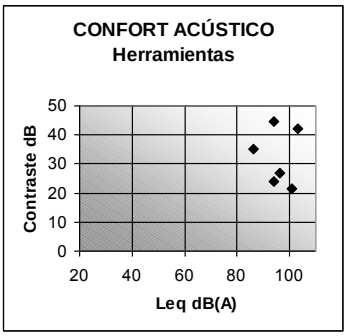
Para cada muestra de sonido se realiza el cálculo del contraste acústico. Los valores obtenidos se comparan con el nivel sonoro Leq dB(A). Los gráficos siguientes muestran los resultados obtenidos del confort acústico de las distintas fuentes de ruido . En estos gráficos se puede ver como cada tipo de ruido ocupa un espacio distinto dentro del  plano. Cada punto representa una fuente de ruido.

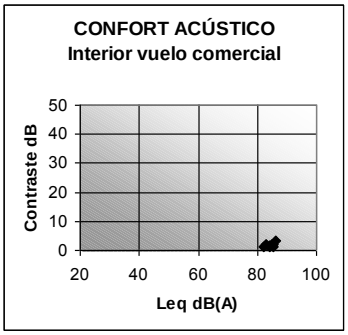

CONFORT ACÚSTICO
Grifo
Contraste dB
Leq dB(A)

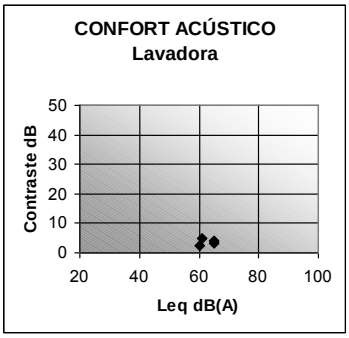

CONFORT ACÚSTICO
Goteo
Contraste dB
Leq dB(A)

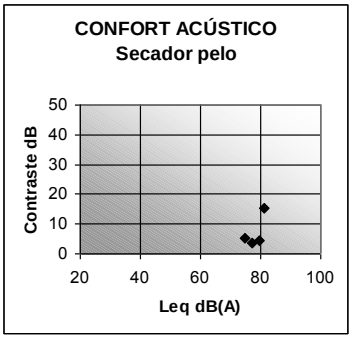

CONFORT ACÚSTICO
Aspiradora
Contraste dB
Leq dB(A)

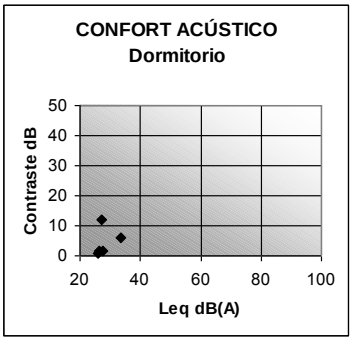

CONFORT ACÚSTICO
Despertador
Contraste dB
Leq dB(A)

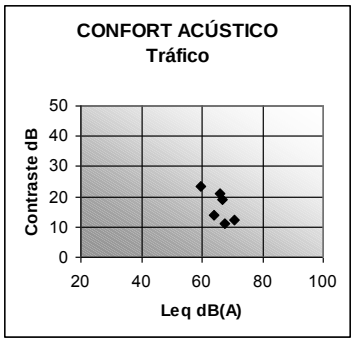

CONFORT ACÚSTICO
Herramientas
Contraste dB
Leq dB(A)

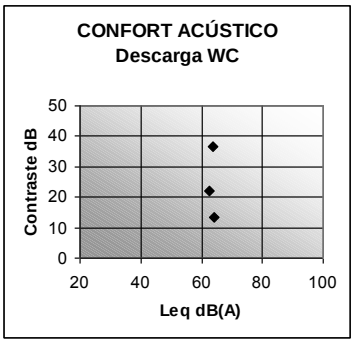

CONFORT ACÚSTICO
Interior vuelo comercial
Contraste dB
Leq dB(A)

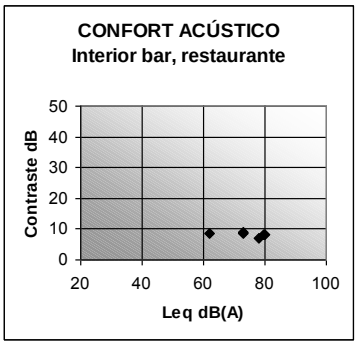

CONFORT ACÚSTICO
Lavadora
Contraste dB
Leq dB(A)

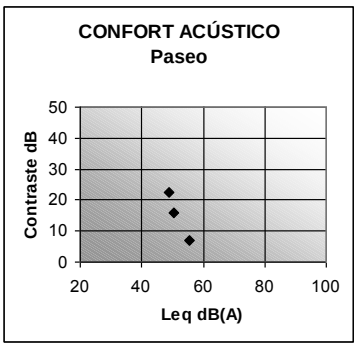

CONFORT ACÚSTICO
Secador pelo
Contraste dB
Leq dB(A)

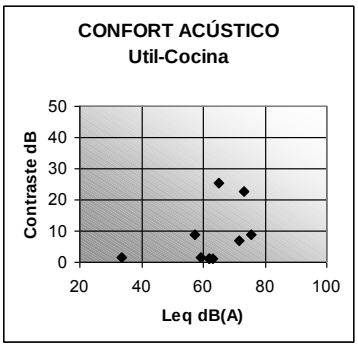

CONFORT ACÚSTICO
Dormitorio
Contraste dB
Leq dB(A)

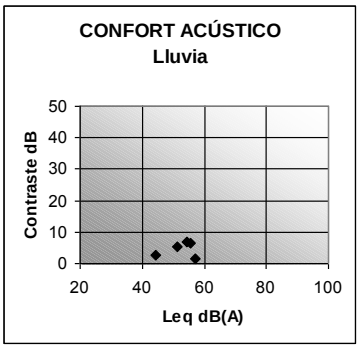

CONFORT ACÚSTICO
Tráfico
Contraste dB
Leq dB(A)


CONFORT ACÚSTICO
Descarga WC
Contraste dB
Leq dB(A)

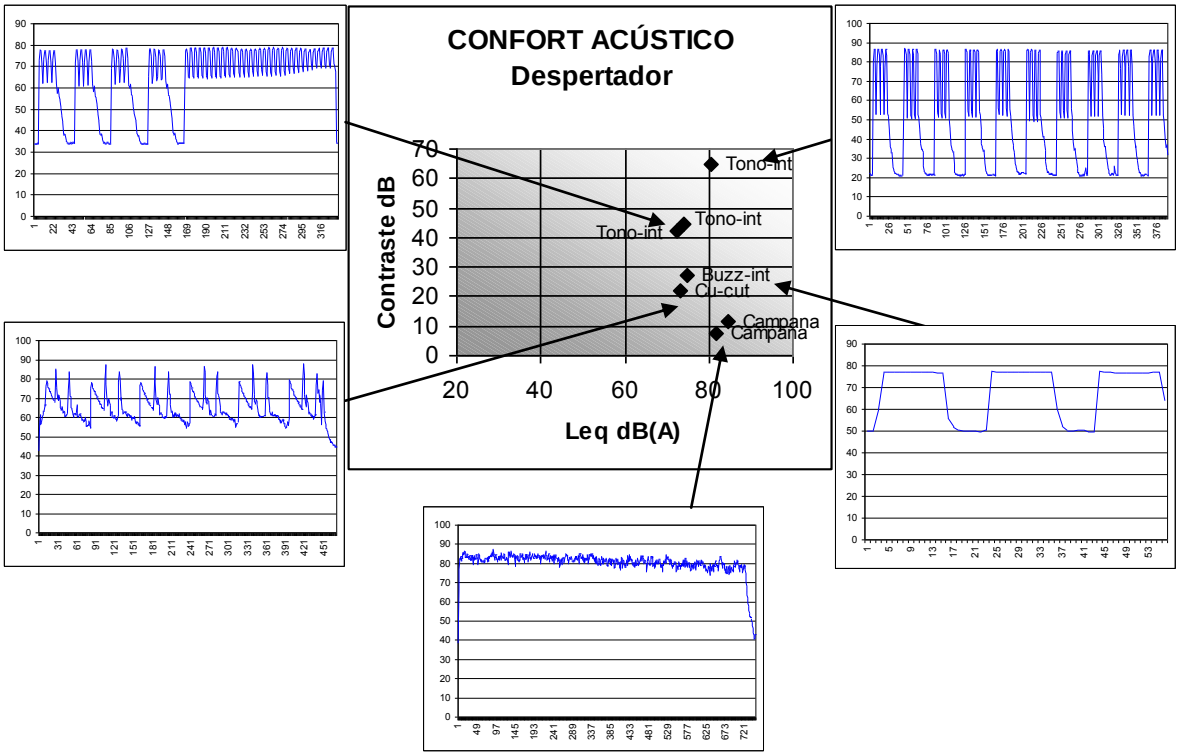

CONFORT ACÚSTICO
Interior bar, restaurante
Contraste dB
Leq dB(A)


CONFORT ACÚSTICO
Paseo
Contraste dB
Leq dB(A)

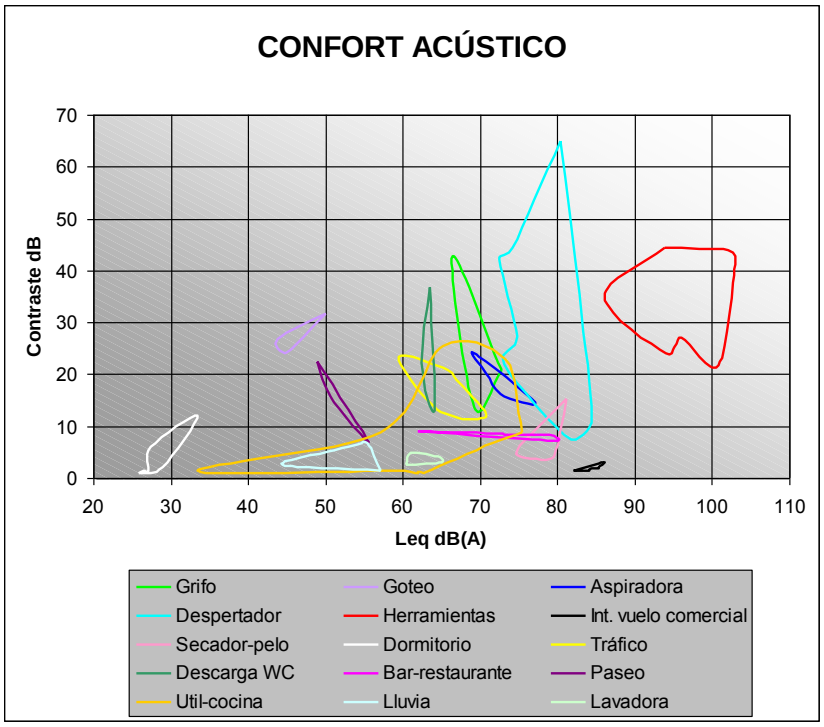

CONFORT ACÚSTICO
Util-Cocina
Contraste dB
Leq dB(A)


CONFORT ACÚSTICO
Lluvia
Contraste dB
Leq dB(A)

Analizamos algunos casos de los ejemplos mostrados. Por ejemplo el ruido de despertadores. La función de un despertador es evidentemente “despertar” a durmiente. Resulta obvio que un estruendo despierta a cualquier persona. No obstante hay casos en que los usuarios manifiestan que no oyen al despertador, o más exactamente, no oyen determinado tipo de despertador. Cuando se dice “oye” realmente hay que interpretar “despertar”. Si vemos el gráfico correspondiente en la página anterior, observamos como los niveles sonoros medidos son similares, oscilando en los casos medidos, entre los 73 y los 84 dB(A). Se han medido distintos tipos de despertador, los de tipo electrónico, los de campana, y el de “cu-cut”.




Como se puede observar, el uso del contraste acústico permite para este grupo, hacer una clasificación en función del tipo de despertador. Los de campana quedan agrupados en la parte inferior del gráfico, y a pesar de ofrecer los niveles sonoros más elevados, no se pueden considerar buenos despertadores, por presentar un bajo contraste. Al lado opuesto tenemos los despertadores electrónicos, con transductor cerámico, que ofrecen niveles sonoros inferiores a los de campana, pero con un contraste muy superior, posibilitando que la persona despierte. Entre ambos grupos tenemos los de cu-cut y los de zumbador, que fueron de los primeros del tipo llamado “electrónico”. Se puede observar como en el dormitorio donde se oyen las voces presenta un contraste acústico muy superior al del dormitorio donde se percibe el ruido de tráfico exterior. El peor lugar de los tres para descansar es el que presenta un mayor nivel de contraste, por dos motivos. Primero, los desniveles mayores producen más molestia y por tanto mayor dificultad para conciliar el sueño. En segundo lugar, escuchar voces procedentes del vecino (no de la TV o similar), atrae mucho más la atención, que escuchar ruido de tráfico, que resulta mucho más monótono. El gráfico siguiente muestra el confort acústico para distintos ruidos, en función del contraste acústico para todos los casos analizados Podemos observar como el contraste permite clasificar distintos tipos de ruido en función de su grado de molestia y agrupar a un mismo tipo de fuente de ruido dentro de una superficie cerrada. Cada tipo de ruido ocupa una zona en el espacio bi-dimensional formado por el Leq dB(A) y Contraste dB. Naturalmente dichas figuras no se pueden considerar definitivas, ya que no se disponen de suficientes muestras como para establecer un patrón único. También se puede observar que hay fuentes de ruido con una baja dispersión de niveles, como el ruido en el interior de un vuelo comercial, o el ruido de lavadora.




**8. CONCLUSIONES.**

- Se ha presentado un indicador basado en los desniveles de ruido que permite explicar porque dos ruidos con un nivel similar presentan distinto grado de molestia.
- Para describir ciertos aspectos del ruido relacionados con su capacidad de molestia, no es necesario recurrir a complejos cálculos. El concepto de diferencia de nivel no es nuevo. Uno de los primeros indicadores fue el TNI (UK) para valorar la molestia que el ruido de tráfico genera sobre la población.
- Los resultados mostrados no se pueden extrapolar a cualquier caso. Sería necesario incrementar el número de muestras y de fuentes de ruido para establecer unos patrones de comportamiento.
- El contraste acústico podría ser muy útil para dar una respuesta objetiva y complementar a los actuales métodos de medida, cuando los niveles de ruido medidos cumplen los límites máximos permitidos, y sin embargo siguen habiendo quejas por parte de los afectados.

**9. BIBLIOGRAFÍA.**

- Barti R. *Ruido de tráfico en la ciudad. Propuesta de nueva normativa.* Tecniacústica 95. La Coruña (1995).
- Berglund B., Lindvall T. *Community Noise* (1995)
- Hiramatsu K, Minoura K, Matsui T, Miyakita T, Osada Y, Yamamoto T. *An analysis of the general health questionnaire survey around airports in terms of annoyance reaction*. Inter Noise 2000, France : The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering 27-30 August 2000, Nice, France.
- Langdon F.J., Scholes W.E, *The traffic noise index: a method of controlling noise nuisance*. Building research Station. 1968.
- Mouret J, Vallet M. *Les effets du bruit sur la santé*. Paris : Ministère de la Santé, 1998.
- Ouis D. *Annoyance caused by exposure to road traffic noise: an update*. Noise Health 2002 ; 4(15) : 69-79.
- Vallet M, Vincent B, Olivier D. *La gêne due au bruit des avions autour des aéroports. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement* - Mission bruit, 2000, Tome 1 ; 126 pages, Tome 2 ; 45 pages.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ACÚSTICA "FORA DA LEI"

PACS: 43.50.Sr

Vitor Rosão
SCHIU, Engenharia de Vibração e Ruído, Unip., Lda.
Av. Villae de Milreu, Bloco E, Loja E, Estoi
8005-466 Faro, Portugal
Tel.: 00351 289998009; Fax: 00351 289998318; email: vitorrosao@schiu.com

## ABSTRACT

The aim of this communication it is analyze the "Outside of Law" (*Contra Legem*) acoustics situations and present, in a reasoned way, what actions are judged more appropriate, given the Engineer's ethical and deontological duties. The analysis and reasoning will be followed by concrete examples for an easier understanding of the *Contra Legem* situations and of the recommended actions.

## 1 INTRODUÇÃO

Tipicamente o ritmo de evolução das publicações científicas é mais rápido do que o ritmo de publicação de normas, e por sua vez o ritmo de publicação de normas é mais rápido do que o ritmo de publicação de legislação.

No sentido oposto, o peso de regra é tipicamente maior na legislação, por ter um caráter de decisão política. Em seguida o peso de regra da norma, por ter sido aprovada por um vasto leque de técnicos, e em último o peso de regra das publicações científicas por terem sido aprovadas por um restrito número de técnicos (*referees*).

É assim absolutamente natural encontrar legislação, em vigor, desatualizada relativamente às mais recentes normas associadas, ou encontrar normas, em vigor, desatualizadas relativamente às mais recentes publicações científicas.

O objetivo do presente artigo é discutir as situações acústicas "Fora da Lei" (*Contra Legem*), com vista a guiar a melhor forma de ação do Engenheiro Acústico (entendido neste artigo em sentido lato, portanto qualquer técnico com responsabilidades similares), perante tais situações especiais, num quadro crescente de responsabilidades do Engenheiro Acústico perante a sociedade.

## 2 SEGUIR A LEGISLAÇÂO À RISCA?

Será que o Engenheiro Acústico deve seguir à risca o estabelecido na legislação acústica, independentemente do estabelecido em normas e publicações científicas mais recentes?

A resposta a esta questão não é consensual, existindo várias pessoas que dirão convictamente sim e várias pessoas que dirão convictamente não. Este tipo de questão, e a existência de pessoas a favor e de pessoas contra, pode encontrar-se até no domínio do Direito propriamente dito [1].

Pesem embora as críticas que podem ser feitas às decisões *Contra Legem* (ver e.g. [2]), e pese embora o facto da maioria das decisões *Contra Legem* de primeira instância serem invalidadas pelas instâncias superiores, a verdade é que existem algumas decisões *Contra Legem* de primeira instância que são validadas pelas instâncias superiores (ver e.g. [3]), assentando normalmente tais decisões extraordinárias numa valoração de princípios superiores, acompanhados por justificações extremamente bem fundamentadas.

Face ao exposto, julga-se que a melhor resposta à questão colocada no início do capítulo será – salvo melhor opinião – a seguinte:

Só em casos extraordinários e devidamente justificados, pode e deve o Engenheiro Acústico tomar decisões *Contra Legem*.

Julga-se importante colocar aqui outra questão: Se não existirem normas e/ou publicações científicas que suportem determinada decisão do Engenheiro Acústico, poderá, deverá, ele tomar essa decisão?

Tratando-se de um caso excecional e devidamente bem fundamentado (de notar que se está a colocar ênfase na excecionalidade e na necessidade de fundamentação; sem suporte de normas ou publicações científicas a fundamentação torna-se ainda mais importante), julga-se que a melhor resposta, salvo melhor opinião, é: **SIM**.

## 3 PODERES E DEVERES DO ENGENHEIRO ACÚSTICO

A publicação do Decreto-Lei n.º 136/2014 [5] e da Portaria n.º 113/2015 [6], reforçam de certa forma os "poderes" do Engenheiro Acústico, na medida em que – em alguns casos – passa a ser suficiente a existência de um "*Termo de responsabilidade de técnico legalmente habilitado"*, atestando a conformidade com a legislação acústica aplicável, para que possa ocorrer a aprovação administrativa.

Tal "poder" do "*Técnico legalmente habilitado*", aqui entendido em sentido lato como Engenheiro Acústico, torna assim mais pertinente a boa capacidade do Engenheiro Acústico para gerir adequadamente as situações normais dentro da lei acústica, e ainda mais as situações excecionais "Fora da Lei" acústica.

Neste quadro assume superior relevância o aprofundamento das questões éticas e deontológicas [7]. De acordo com o artigo [8] são as seguintes as virtudes do Engenheiro:

"*Auto-direcção (e.g., auto-compreensão, coragem e perseverança, integridade); orientação para o bem geral (e.g., dos clientes e da sociedade em geral), trabalho em equipa (e.g., cooperação, saber ouvir) e proficiência (e.g., competência, diligência)*".

Deve assim o Engenheiro Acústico ter a "*Proficiência*" e "*Auto-direção*" necessárias para saber decidir, de forma fundamentada, quando deve e quando não deve seguir à risca a legislação

acústica em vigor, tendo por base uma "*Orientação para o bem geral*", ouvindo/considerando a opinião de outros colegas e/ou instituições.

Caso o Engenheiro Acústico decida *Contra Legem*, assume maior importância a explicitação e justificação de tal decisão. Tendo por base o documento [9], da Sociedade Portuguesa de Acústica, julga-se que nestes casos especiais deverá ser devidamente preenchida a alínea 3) (Eventuais observações pertinentes) do modelo tipo de Termo de Responsabilidade constante na última página do documento [9].

No capítulo seguinte apresentam-se exemplos concretos de situações acústicas "Fora da Lei", e discutem-se as ações associadas consideradas mais adequadas.

## 4 EXEMPLOS DE SITUAÇÕES "FORA DA LEI"

### 4.1 Exemplo 1

Sabendo que o documento [10], da Organização Mundial de Saúde, estabelece $L_{night,outside}$ = 30 dB(A) como limite para *No Observed Effect Level* (NOEL), e sabendo que o limite mais exigente do DL 9/2007 [11], para o período noturno, é de 45 dB(A), deve o Engenheiro Acústico "exigir", *Contra Legem*, o cumprimento de $L_{night,outside} \leq 30$ dB(A)?

Julga-se que, regra geral e salvo melhor opinião, a resposta mais correta é: **NÃO**.

Uma vez que a definição de limites acústicos legais pode ter influência significativa em termos económicos, a decisão sobre esses limites tem de ser política e baseada em diferentes aspetos para além da informação técnica/científica disponível sobre a matéria.

Assim não pode, não deve, o Engenheiro Acústico substituir-se ao legislador, devendo confinar-se à aplicação estrita dos limites acústicos legais em vigor.

Pese embora o referido, deve o Engenheiro Acústico ter também em conta os seguintes textos exemplificativos de diferentes Acórdãos sobre o direito ao descanso [12]:

"*O DL n.º 251/87, de 24 de Junho (Regulamento Geral sobre o Ruído) não se destinou, nem se destina, a resolver conflitos que possam surgir entre o direito de propriedade do prédio (estabelecimento) onde se desenvolva actividade que produza ruído e os direitos à integridade física e moral das pessoas, à saúde, ao ambiente e à qualidade de vida*".

"*A ofensa do direito ao repouso, ao descanso ou ao sono não é excluída pela simples circunstância de a actividade em causa ter sido autorizada administrativamente – a consagração legal de um valor máximo de nível sonoro do ruído apenas significa que a Administração não pode autorizar a instalação de equipamento, nem conceder licenciamento de actividades que não respeitem aquele limite*".

"*Face à lei civil, deve entender-se que o direito de oposição à emissão de ruídos subsiste mesmo que o seu nível sonoro seja inferior a 10 decibéis*"[1].

Perante tal constatação, pode e deve o Engenheiro Acústico informar o seu Cliente, sobretudo quando o mesmo corresponder a uma atividade económica, que o cumprimento estrito dos limites acústicos legais administrativos não exclui o direito de oposição por parte de alguém que considere estar a ser incomodado pelo ruído proveniente da atividade em causa.

[1] Os 10 dB referem-se ao limite acústico legal estabelecido no DL 251/1987 [13] (1.ª versão do Regulamento Geral do Ruído, cuja versão atualmente em vigor corresponde ao DL 9/2007 [11]).

Deve assim o Engenheiro Acústico decidir em conjunto com o seu Cliente qual o melhor limite a verificar, balizados, obviamente, pelo limite acústico legal administrativo aplicável.

Por uma questão de transparência, e caso seja acordado com o Cliente um limite mais restrito, recomenda-se que conste no Termo de Responsabilidade texto semelhante ao seguinte: "*Por acordo entre o Autor e o Requerente foi decidido observar um limite mais restrito do que o estabelecido legalmente, conforme consta no Relatório Técnico que se anexa*".

De notar que se considera importante, para própria "defesa" do Engenheiro Acústico que assina o Termo de Responsabilidade, anexar ao Termo de Responsabilidade o Relatório Técnico de Projeto ou de Avaliação Acústica. A recomendação de anexação de Relatório Técnico consta inclusive do modelo tipo de Termo de Responsabilidade que se encontra na última página do documento [9] da Sociedade Portuguesa de Acústica.

### 4.2 Exemplo 2

Na Avaliação Acústica de determinado Restaurante, à luz do Artigo 6.º do DL 96/2008 [14], deverá ser verificado o Isolamento Sonoro de Fachada ($D_{2\ m,\ nT,\ w} \geq 25$ dB) e o Tempo de Reverberação ($T \leq 0{,}15\ V^{1/3}$).

Admitindo que o proprietário do Restaurante irá trabalhar de porta aberta, deverá o Engenheiro Acústico "exigir" a verificação do Isolamento Sonoro de fachada e do Tempo de Reverberação com a porta fechada?

Julga-se que, regra geral e salvo melhor opinião, a resposta mais correta é: **NÃO**.

De notar que o número 5 do Artigo 10.º do DL 136/2014 [5] estabelece o seguinte:

"*Os autores e coordenador dos projetos devem declarar … quais as normas técnicas ou regulamentares em vigor que não foram observadas na elaboração dos mesmos, fundamentando as razões da sua não observância*".

Está assim previsto legalmente, nos procedimentos administrativos, a possibilidade de não observação total dos regulamentos em vigor, devendo contudo ser devidamente fundamentada a razão da não observância, deixando os Termos de Responsabilidade de constituir garantia bastante (número 8 do Artigo 20º do DL 136/2014 [5]).

Na alínea (i) das instruções de preenchimento do Termo de Responsabilidade I, do Anexo III da Portaria n.º 113/2015 [6], consta o seguinte texto:

"*Discriminar, designadamente, as normas técnicas gerais e específicas … bem como justificar de forma fundamentada os motivos da não observância das normas técnicas e regulamentares …*".

Assim, no caso em exemplo, recomenda-se que conste texto semelhante ao seguinte, na alínea a) do Termo de Responsabilidade I do Anexo III da Portaria n.º 113/2015 [6]: "*Observa as normas legais e regulamentares aplicáveis, designadamente o Artigo 6.º do DL 96/2008. Salienta-se que conforme Declaração Anexa do Requerente, e conforme Relatório Técnico Anexo, o estabelecimento trabalhará de porta aberta, pelo que a medição do Tempo de Reverberação foi efetuada com a porta aberta e não foi medido o Isolamento Sonoro de fachada por falta de significado*".

De notar que se considera importante, para a própria "defesa" do Engenheiro Acústico, existir Declaração assinada por responsável do estabelecimento, relativamente à assunção de que o estabelecimento trabalhará de porta aberta.

**4.3 Exemplo 3**

No Anexo D da NP ISO 1996-2: 2011 [15] está estabelecido o seguinte:

"*Para detectar a presença de uma componente espectral de frequência discreta proeminente (tom) é usual comparar o nível sonoro médio de uma banda de terços de oitava com os níveis sonoros médios das duas bandas de terços de oitava adjacentes … Algumas escolhas possíveis para o nível de diferença constante são: 15 dB nas bandas de terços de oitava de baixas frequências (25 Hz a 125 Hz); 8 dB nas bandas de frequências médias (160 Hz a 400 Hz); 5 dB nas bandas de altas frequências (500 Hz a 10000 Hz)*".

No número 1 do Anexo I do DL 9/2007 [11] está estabelecido o seguinte:

"*O método para detectar as características tonais do ruído dentro do intervalo de tempo de avaliação, consiste em verificar, no espectro de um terço de oitava, se o nível sonoro de uma banda excede o das adjacentes em 5 dB(A) ou mais, caso em que o ruído deve ser considerado tonal*".

Admita-se que em determinada situação se verifica que o ruído, devido a determinada atividade, possui um nível sonoro, na banda de 1/3 de oitava de 63 Hz, 10 dB(A) superior ao das bandas adjacentes.

Deve o Engenheiro Acústico considerar que se trata de Ruído Tonal, à luz do estabelecido no DL 9/2007 [11] (diferença superior a 5 dB(A)), independentemente de à luz do estabelecido na NP ISO 1996-2: 2011 [15] (diferença inferior a 15 dB(A)) não se tratar de Ruído Tonal?

Julga-se que, regra geral e salvo melhor opinião, a resposta mais correta é: **NÃO**.

Ainda que, em certa medida, este exemplo seja semelhante ao Exemplo 1, uma eventual decisão *Contra Legem* de utilização, no presente exemplo, do critério menos estrito de determinação das Caraterísticas Tonais estabelecido na NP ISO 1996-2: 2011 [15], não possui o mesmo grau negativo de "substituição do legislador" do Exemplo 1, pois não estamos a utilizar um novo método, estamos apenas a utilizar a versão mais recente do método estabelecido na legislação em vigor. Acresce ao referido o facto de estarmos no sentido contrário em termos dos efeitos económicos (critério da nova versão menos estrito que o critério da versão anterior).

Conforme explicitado no Exemplo 1, deve ser tido, contudo, algum cuidado na utilização de critérios menos estritos, porquanto o cumprimento dos limites acústicos estabelecidos cientificamente não exclui o direito de oposição por parte de alguém que considere estar a ser incomodado pelo ruído proveniente da atividade em causa.

Assim, no caso de uma Avaliação Acústica sobre o denominado Critério de Incomodidade (alínea b) do número 1 do Artigo 13.º do DL 9/2007 [11]), poderá e deverá ser questionada a(s) pessoa(s) que mora na habitação onde está a ser feita a medição de ruído sobre a sua sensibilidade ao ruído em causa, ou seja, se considera, ou não, o mesmo como incomodativo. De referir a este respeito a norma NP 4476: 2008 [16]. De referir também a conveniência de existência de Declaração assinada relativamente à existência, ou não, de incomodidade acústica.

Caso a resposta seja existir incomodidade ao ruído, e o limite acústico legal apenas não é cumprido considerando o critério de determinação das caraterísticas tonais do DL 9/2007 [11], então a tendência deverá ser a de seguir à risca o critério legal.

Caso a resposta seja não existir incomodidade ao ruído, e mais uma vez o limite acústico legal apenas não é cumprido considerando o critério de determinação das caraterísticas tonais do

DL 9/2007 [11], então a tendência deverá ser a de seguir, *Contra Legem*, o critério da nova versão do método de determinação das caraterísticas tonais estabelecido na NP ISO 1996-2: 2011 [15].

### 4.4 Exemplo 4

O DL 9/2007 [11] estabelece, para o Critério de Incomodidade:

"*Para efeitos da verificação dos valores fixados na alínea b) do n.º 1 e no n.º 5 do artigo 13.º, o intervalo de tempo a que se reporta o indicador $L_{Aeq}$ corresponde ao período de um mês, devendo corresponder ao mês mais crítico …*".

O documento [17], da Agência Portuguesa do Ambiente, estabelece, para o Critério de Incomodidade:

"*O ensaio acústico para caracterização do ruído ambiente deve … em caso de reclamação prévia, realizar-se apenas nas condições de funcionamento da atividade referidas pelo reclamante como estando na origem da incomodidade*".

Para verificação do cumprimento do requisito legal deve o Engenheiro Acústico restringir-se a medir apenas as condições que estão na origem da incomodidade, conforme recomendado no documento [17] ou deve procurar caraterizar um valor médio mensal conforme referido na legislação [11]?

Salvo melhor opinião, considera-se que em termos de verificação estrita do limite acústico legal deve ser caraterizada a média mensal, contudo para melhor análise da situação de incomodidade adquire especial importância o conhecimento dos valores nas condições em que é experimentada a incomodidade.

## 5 A IMPORTÂNCIA E DIFICULDADE DE ANÁLISE DA INCOMODIDADE ACÚSTICA

Considera-se ser de salientar que a incomodidade acústica é um tema de elevada relevância para a sociedade, como atesta o seu primeiro lugar no *ranking* de queixas ambientais apresentadas ao Provedor de Justiça [4]. Por outro lado podem ser muito graves para a sociedade as consequências da incomodidade acústica, como atestam as seguintes notícias:

24-05-2013 [18]: "*Homem mata vizinhos após briga por barulho*".

29-08-2015 [19]: "*Aquilo que sabemos é que o senhor Rogério [autor dos disparos] já tinha ameaçado o vizinho de que o matava a ele e à família se o cão não deixasse de fazer barulho, mas nunca nos passou pela cabeça que o fizesse mesmo*".

Nestas circunstâncias, assume especial relevância a análise cuidada das situações de incomodidade acústica por parte de todos os intervenientes, incluindo o Engenheiro Acústico.

Deve o Engenheiro Acústico ter bem presente que a pessoa incomodada por determinado ruído passa a ser, de certa forma, um "especialista" na audição desse ruído, pelo que caso o Engenheiro Acústico não consiga ouvir o ruído que o queixoso reporta não significa obrigatoriamente que esse ruído não exista, pode apenas significar que o Engenheiro Acústico está menos "habituado" na audição desse ruído.

Claro está que em alguns casos particulares o problema de ruído pode existir apenas na cabeça do queixoso, devendo o Engenheiro Acústico estar também preparado para tratar com isenção, sobriedade e compreensão tais situações.

O ruído é um fenómeno complexo não só em termos psicológicos mas também em termos físicos. Se a incomodidade é experimentada na posição deitado então a posição normal de pé não é a melhor posição para analisar a incomodidade que é experimentada na posição deitado.

Deve o Engenheiro Acústico estar consciente de que o Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (Valor Médio Energético), Ponderado A, $L_{Aeq}$, é, desde 1982 [20], o parâmetro de referência para a afetação humana devido ao ruído, assumindo-se como regra geral que quanto maior o valor desse parâmetro maior a probabilidade de afetação acústica, contudo tal parâmetro e tal regra não são universais. Atente-se aos pontos seguintes que são apenas exemplificativos e não englobam todas as limitações dos métodos atuais.

1. A Malha A de ponderação em frequência não é a mais adequada para sons com maior intensidade sonora [21], em especial para sons de Baixa-Frequência que necessitam de outro tipo de análise [22].
2. O Valor Médio Energético, $L_{Aeq}$, não é em certos casos a melhor forma de limitação, o que faz com que em alguns países existam não só limites de $L_{Aeq}$ mas também limites de Valor Máximo [23].
3. Nem sempre um ruído com maior valor de $L_{Aeq}$ significa maior incomodidade acústica, não só devido a caraterísticas físicas específicas (impulsividade, tonalidade, etc) mas também devido ao facto de para um ruído menos intenso ser tipicamente mais difícil identificar a origem desse ruído, o que pode gerar uma incomodidade particular acrescida.

## 6 CONCLUSÕES

Espera o autor ter tido a "*Proficiência*" e "*Auto-direção*" certas para tratar da melhor forma, com "*Orientação para o bem geral*", este tema controverso. Espera ainda o autor que este artigo possa, na sua própria medida, ajudar os Engenheiros Acústicos a formar e a fundamentar a sua própria opinião (objetivo último deste artigo) sobre a Acústica "Fora da Lei", mesmo que essa opinião possa ser diferente da opinião aqui expressa.

Ainda que o cumprimento estrito da lei acústica administrativa comporte normalmente menores riscos para o Engenheiro Acústico, deve o Engenheiro Acústico não esquecer que a coragem e a orientação para o bem geral fazem parte das virtudes do Engenheiro [8].

Não esquecer também que a coragem certa não estará sempre no sentido da *Contra Legem*, estará também, muitas vezes, no sentido da hombridade do cumprimento estrito da legislação em vigor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que tiveram a amabilidade de partilhar comigo a sua opinião sobre este assunto. Agradeço em especial ao amigo e ilustre colega Eng.º Álvaro Grilo e à amiga e ilustre advogada Dr.ª Dina Sousa, os quais têm a sabedoria de ter, em alguns casos, uma opinião diferente da minha.

## REFERÊNCIAS

[1] Miller, Fernando Faria – *Abordagem Crítica do Direito Alternativo.* Revista Forense, vol. 327, p. 43/50, 1994. http://www.milleradvocacia.com.br/portugues/artigos/art_001.pdf
[2] Junior, Goffredo Telles – *O Chamado Direito Alternativo*. 1999. http://www.revistas.usp.br/rfdusp/article/viewFile/67433/70043
[3] http://validadeejustica.blogspot.pt/2009/10/decisao-judiciaria-contraria-lei.html

[4] Provedor de Justiça - *Inquérito à Prevenção e Controlo Municipal do Ruído*. Lisboa, 2012. http://www.provedor-jus.pt/archive/doc/Inquerito_prevencao_e_controlo_m_do_ruido.pdf
[5] Diário da República Portuguesa – Decreto-Lei n.º 136/2014, de 9 de Setembro. *Regime Jurídico da Urbanização e Edificação* (RJUE).
[6] Diário da República Portuguesa – Portaria n.º 113/2015, de 22 de Abril. *Elementos Instrutores dos Pedidos de Realização de Operações Urbanísticas*.
[7] Carrapeto, Carlos; Fonseca, Fátima – *Ética e Deontologia: Manual de Formação*. Ordem dos Engenheiro Técnicos, Lisboa, 2012. ISBN 978-972-99919-1-2 https://www.oet.pt/downloads/informacao/Etica_Deontologia-Manual_Formacao.pdf
[8] http://www.eticaed.org/Artigo.pdf
[9] http://www.spacustica.pt/images/DIR-05-2015_Portaria_113_2015_Esclarecimentos.pdf
[10] World Health Organization – *Night Noise Guidelines for Europe*. 2009. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf
[11] Diário da República Portuguesa – Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro. *Regulamento Geral do Ruído.*
[12] Gabinete de Juízes Assessores do Supremo Tribunal de Justiça, Assessoria Cível – *O direito ao descanso e ao sossego na jurisprudência das Secções Cíveis do Supremo Tribunal de Justiça: Sumários de Acórdãos de 1997 a Setembro de 2012*. 2012. http://www.stj.pt/ficheiros/jurisp-tematica/direitodescansososSego.pdf
[13] Diário da República Portuguesa – Decreto-Lei n.º 251/1987, de 24 de Junho. *Regulamento Geral sobre o Ruído.*
[14] Diário da República Portuguesa – Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho. *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.*
[15] International Organization for Standardization, ISO 1996-2 – *Acoustics: Description, measurement and assessment of environmental noise: Part 2: Determination of environmental noise levels*. 2007. (NP ISO 1996-2: 2011)
[16] International Organization for Standardization, ISO/TS 15666 – *Acoustics: Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*. 2003. (NP 4476: 2008)
[17] Agência Portuguesa do Ambiente – *Guia prático para medições de ruído ambiente – no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996*. 2011.
[18] http://www.dgabc.com.br/Noticia/457926/homem-mata-vizinhos-apos-briga-por-barulho
[19] http://www.jn.pt/PaginaInicial/Justica/Interior.aspx?content_id=4752214
[20] International Organization for Standardization, ISO 1996-1 – *Acoustics: Description and measurement of environmental noise: Part 1: Basic quantities and procedures*. 1982. (NP 1730-1: 1996)
[21] Pierre, Richard; Maguire, Daniel – *The Impact of A-weighting Sound Pressure Level Measurements during the Evaluation of Noise Exposure*. Baltimore, Noise-Con, 2004. http://storeycountywindfarms.org/ref3_Impact_Sound_Pressure.pdf
[22] Waye, Kerstin – *Health aspects of low frequency noise*. Honolulu, Inter-Noise, 2006. http://www.researchgate.net/publication/255968989_Health_aspects_of_low_frequency_noise._%28Invited_paper%29
[23] Rosão, Vitor; Conceição, Eusébio – *Sugestões Fundamentadas de Alteração do Decreto-Lei n.º 9/2007, de Acústica Ambiental*. Cáceres, TecniAcustica, 2011.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MEDIO SIGLO EN LA ACÚSTICA DEL MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

## El sonido del Arquitecto Pedro Ramírez Vázquez

PACS: 43.55.Gx

Torres Sánchez, Patricia[1]; Daumal i Domènech, Francesc[2]; Ramos Galino, Fernando[2]
1.- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
Campus Santa Fe. Av. Carlos Lazo No. 100, Col. Santa Fe
01389 México DF. 525591778000
E-mail: patriciatorres@itesm.mx
2.- Escola Tècnica Superior d´Arquitectura de Barcelona (UPC)
Av. Diagonal, 649
08028 Barcelona
E-mail: francesc.daumal@upc.edu, fernando.ramos@nobel.upc.edu

**ABSTRACT**

This release is grounded on studies performed through the analysis of the architectonic fact as well as the personal interviews and first hand review of Architect's Pedro Ramírez Vázquez personal documents and records who, until his recent death was responsible, with his partners for the design, construction, and preservation of the National Museum of Anthropology in Mexico City. This research - which is part of a doctoral thesis with a wider scope - has taken as its 'generative matrix', the illusion that boosted this architect stablishing a didactic and symbolic system of architectural elements for the visitor's senses, within which he obviously highlighted that of sounds applied for different spaces, designed and perpetuated during more than fifty years in this marvelous museum.

Keywords: sound absorption, historic building, signage, México, Pedro Ramirez Vazquez, museum.

**RESUMEN**

El presente texto se basa en el estudio de la señalética en los plafones y de la acústica de las salas de exposiciones del Museo Nacional de Antropología (MNA) de la ciudad de México, a partir del análisis minucioso de la documentación personal de primera voz y mano del arquitecto Pedro Ramírez Vázquez, quien, junto con su equipo de colaboradores diseñó, construyó y conservó el recinto, hasta su fallecimiento en 2013. Esta investigación, que es parte de una tesis doctoral de ámbito más amplio, ha tomado como matriz generadora el ideario que impulsó a este arquitecto para establecer un sistema didáctico y simbólico de elementos arquitectónicos que ofrecen a los visitantes una serie de recursos sensoriales, entre los que destaca la incorporación de sonidos a los diferentes espacios, diseñados y perpetuados durante más de cincuenta años en este museo ejemplar.

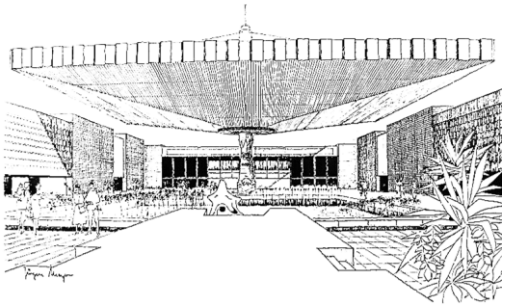
Palabras clave: absorción acústica, edificio histórico, señalética, México, Pedro Ramírez Vázquez, museo.

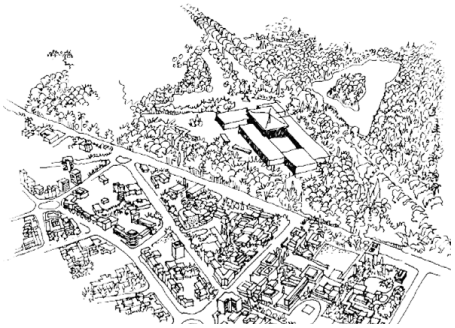
## INTRODUCCIÓN

El Museo Nacional de Antropología es una obra notable en la historia de la arquitectura mexicana del siglo XX debido a sus múltiples aportaciones en el rubro museístico. Fue declarado en diciembre de 1999, Monumento Artístico de México.

Antes de este proyecto, la concepción de la tipología de museo en el mundo era distinta. Consistía en la exhibición de objetos dentro de construcciones históricas o en el mejor de los casos, en la adaptación de las mismas. Por primera vez en la historia, un museo de antropología tenía la función de enseñar a través de su recorrido; siendo ésta su innovación principal. Independientemente de muchas otras aportaciones poco conocidas, tanto para las personas que lo visitan, como para los estudiantes y profesionales de la arquitectura, es debido a que la gran mayoría de libros, publicaciones e investigaciones sobre este museo se enfocan en el estudio del contenido arqueológico de las salas, se considera que es prioritario difundir el conocimiento didáctico, arquitectónico y constructivo relacionado con esta obra de diseño sin precedentes.

La investigación original de donde se extrajo este texto analizó de manera detallada los documentos de uso interno del despacho Ramírez Vázquez y Asociados sobre el Museo Nacional de Antropología, junto con el archivo personal del arquitecto. Esto ha proporcionado material inédito y de primera mano, discutido en su momento con el propio Arq. Ramírez Vázquez para, finalmente, se ha integrado con la información de las oficinas del Museo Nacional de Antropología y del Instituto Nacional de Antropología e Historia, así como otras fuentes secundarias.





Figuras 1 y 2. Croquis de emplazamiento
Ramírez Vázquez y Asociados. Dibujo de “Baumeister” No. 11 Enero de 1965. Ed. Múnich (München).

## GÉNESIS DEL PROYECTO

Entre 1958 y 1964, durante el periodo presidencial del Lic. Adolfo López Mateos y siendo Secretario de Educación Pública el Dr. Jaime Torres Bodet, se inició un Plan de Once Años[1] para abordar la problemática de la educación primaria en el país. En este tiempo se fundó la Comisión Nacional de Libros de Texto Gratuitos y se promovió la construcción del Museo Nacional de Antropología, la del Museo de Arte Moderno y se encargó de la organización y la adaptación de los Museos de Arte Virreinal y de Pintura Colonial. Como resultado de estas acciones, se concluyeron las obras del Museo Nacional de Antropología en el año de 1964, con dos objetivos principales: acrecentar la enseñanza extraoficial y reivindicar la civilización mesoamericana de México.

1 (Rangel Guerra, 2002, pág. 9)

El Museo Nacional de Antropología fue concebido, proyectado, construido y puesto al servicio de los visitantes con la directriz de la educación. Con una visión clara de las necesidades, el Arq. Pedro Ramírez Vázquez dirigió con habilidad a un grupo interdisciplinario de destacados asesores conmovidos por las intenciones formativas y la proyección cultural del museo, así como un conjunto de constructores dispuesto a innovar y dar las soluciones apropiadas al proyecto, de tal forma que el proyecto arquitectónico fue nutrido por un sinnúmero de mentes que aportaron soluciones innovadoras para la época, que vieron en la construcción del Museo la oportunidad de educar a las personas a través del conocimiento de su pasado glorioso.

Para el Dr. Eusebio Dávalos quien fuera director del MNA hasta 1968, año de su fallecimiento, el conocimiento y la valoración de los orígenes y de los ancestros era el instrumento para forjar la personalidad y un sentimiento de libertad de los mexicanos. En su texto Significado del museo en la cultura menciona que únicamente “conociendo los defectos y virtudes de quienes nos antecedieron podremos normar nuestro futuro sin titubeos, ni ensayos exóticos.” Esta visión llevó al Dr. Dávalos a jugar un papel muy importante en la concepción del museo, enfatizando a cada momento la vocación educativa del proyecto, siendo un fiel guardián del ideal del Museo Nacional de Antropología, inaugurado en el año 1964, esta obra representa el resguardo de la historia y cultura mexicana.

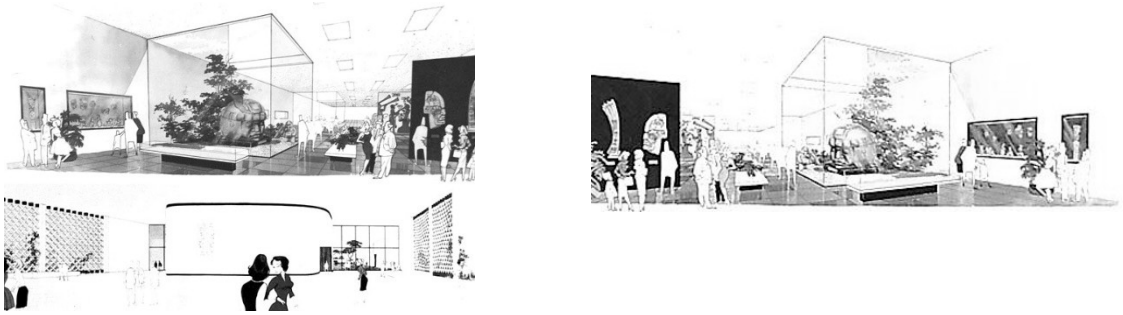


Figura 3. Conceptos
Propuestas y diversas ideas sobre la Museografía. Diapositiva: Archivo del Arquitecto Pedro Ramírez Vázquez ©

Ramírez Vázquez enfatizó el aspecto didáctico a través del recorrido del Museo que pretendía dar una visión de la historia de México. Concentró así dentro de él, sólo las piezas más representativas y simbólicas de la historia mexicana.

En el diseño del Museo, todo debía perseguir un mismo fin, enseñar. Por ello cada detalle fue una oportunidad potencial para transmitir algún conocimiento. Este pensamiento es el que inspiró este documento de investigación, donde se expone, desde el objeto más sencillo hasta el conjunto que hablan de la grandeza de un pueblo.

## EL EDIFICIO

La obra incorporó elementos de la arquitectura mesoamericana, específicamente de la cultura Maya, reinterpretadas mediante un lenguaje contemporáneo y mezclando los sistemas constructivos artesanales y los sistemas prefabricados de la época. Esto dio la oportunidad a los constructores nacionales de contribuir con su conocimiento y experiencia, suscitándose un fenómeno nacionalista entre todos los participantes, quienes hicieron su mejor esfuerzo y pusieron al servicio del Museo a su mejor personal. Orgullosos de ello, un número considerable de anuncios publicitarios de dichas empresas promocionaron su éxito y calidad de sus servicios

al ser parte de la construcción del gran proyecto, agradeciendo la confianza depositada en ellos.

*"Con un alto grado de innovación el proyecto del Museo plantó tres funciones principales: estética, didáctica y social."* [2]

Dentro del Museo Nacional de Antropología existen diversas manifestaciones plásticas como las pinturas murales que se integran a la arquitectura con fines didácticos. De esta misma forma el plafón diseñado para las zonas de exhibición da una muestra del concepto y fines de enseñanza del conjunto.

Es posible recorrer una sala e interactuar con un mural que representa de tamaño natural a los animales prehistóricos, permitiendo al visitante ser parte del mundo de aquella época, con su escala 1:1.

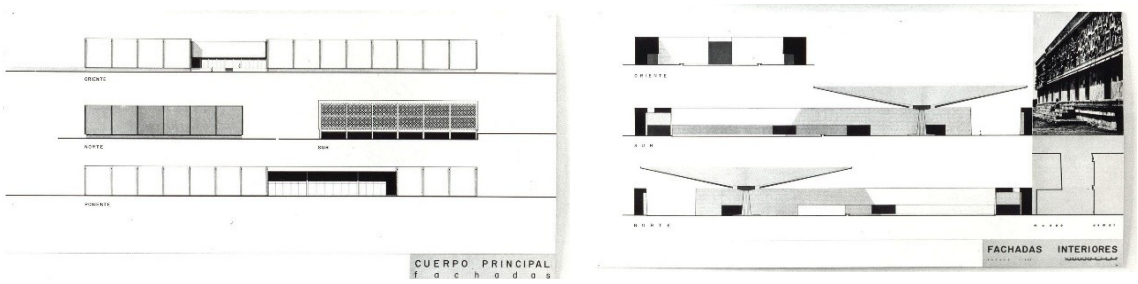
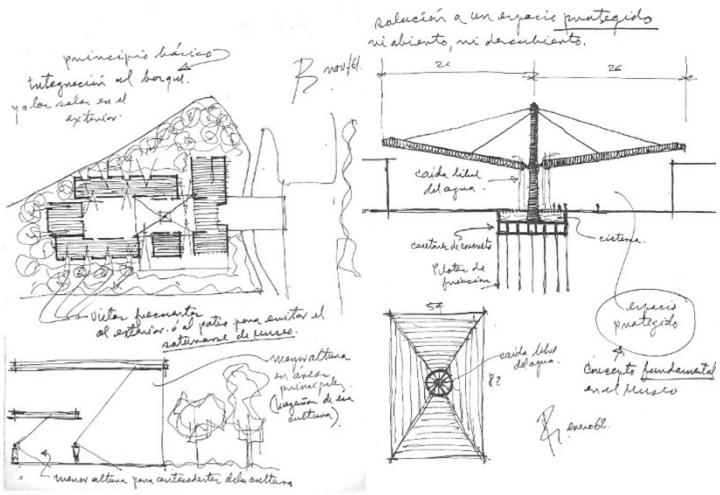



Figura 4. Alzados
Planos del Anteproyecto del Museo Nacional de Antropología. Fotografía: Archivo del Arquitecto Pedro Ramírez Vázquez ©



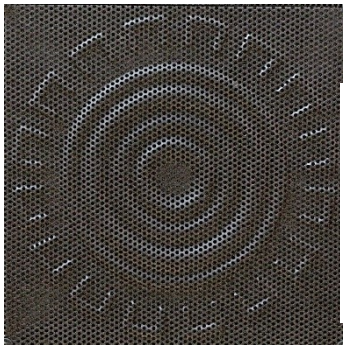
Figuras 5 y 6. Bocetos conceptuales
Primeros bocetos de los elementos del patio central. Bocetos: Archivo del Arquitecto Pedro Ramírez Vázquez ©

2 (Ramírez Vazquez, 1968, pág. 19)

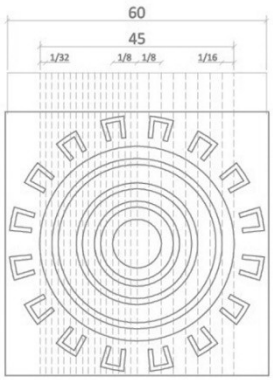
## LOS PLAFONES

Como parte del proyecto arquitectónico, los plafones son elementos de la arquitectura sencillos, los cuales en la mayoría de los procesos son poco importantes sin embargo en el proyecto del Museo, buscó a través de ellos una manifestación estética y de funcionamiento innovador.

En el caso particular de este documento, se hace un especial énfasis en el diseño del plafón de las salas de exposiciones, estudiado desde su diseño y su función hasta su papel fundamental como objeto de la señalética del Museo. La señalética como técnica de comunicación visual, orientó y guio, permitió a los educadores y proyectistas del MNA, enseñar y guiar, a visitantes y constructores del Museo.








Figuras 7, 8 y 9. Plafón Metálico, representación floral y análisis formal
Plafón metálico de la Sala d Exposiciones por FORJACERO, S.A. © Patricia Torres, 2014
Sello indígena floral. El Contador, México.
(Enciso, 1953, págs. 45) Figura 1.

El estudio de los plafones del Museo emana de su consideración como símbolo o señal que apoya la circulación dentro del Museo. Esta señal o marca diferenciadora auxilia la guía y tránsito dentro del Museo. Como en muchas ciudades, el uso de pictogramas es común para señalizar, aunque cabe mencionar que en México, ha sido utilizado con éxito. Muestra de ello es el metro de la Ciudad de México, donde las estaciones están señalizadas con un gráfico, carente de texto, que nos remonta al uso de glifos en la cultura prehispánica con la finalidad de identificar comunidades y ciudades precolombinas. Estos símbolos gráficos, dibujos, flechas, etc. deben de utilizar formas muy sintéticas y de rápida percepción.

En el diseño de los plafones del Museo podemos encontrar dos momentos clave: el primero como elemento que se convierte en una señal que apoya la circulación dentro del Museo, y el segundo cuando se define para ser utilizado como el organizador de las instalaciones supeditando a los diferentes servicios al estricto módulo reticular de 60 x 60 cm, relacionado con la modulación general del inmueble de base 90 cm.

## SEÑALÉTICA

La "*señalética*"[3] reflejada a través del diseño de los plafones; representa y desarrolla como un sistema de comunicación visual, el cual se sintetiza a través del conjunto de señales y símbolos

3 << Señalética es una técnica de la comunicación visual, que se encarga del estudio de las relaciones funcionales entre los signos de orientación en el espacio y los comportamientos de los individuos ante ellos. >> (Costa, 1987)

cuya su función es la de guiar, orientar u organizar. En el caso del MNA el plafón ocupó un lugar privilegiado; este dio pie al manejo de instalaciones a través de un sistema modular, que dio flexibilidad y generó un claro entendimiento del funcionamiento constructivo del Museo, integrando los procesos constructivos tradicionales con la tecnología más avanzada del momento, indicando recorridos y sitios puntuales con las luces.

La señalética está constituida como una ciencia que colabora con la ingeniería organizacional, la arquitectura, el acondicionamiento del espacio y la ergonomía bajo el vector del diseño gráfico. Se utiliza para orientar a las personas cuando acceden a ciertos servicios y para dar mayor certidumbre en su desplazamiento. Por ello su importancia dentro del Museo, ya que, aun cuando existen señales que indican los recorridos dentro del Museo, el plafón de las salas de exposiciones permanentes y temporales sirve de guía y reconocimiento del camino a seguir dentro de la exposición. Ya sea a través de la concentración de luces, de la ausencia de las mismas, de un cambio de altura o de un cambio de plafón, este elemento que limita el espacio, contribuye al recorrido educativo del Museo. Este plafón, dentro de la clasificación de las señales de acuerdo a su objetivo, lo podemos ubicar dentro de las orientadoras, que tienen como objeto ubicar a los individuos en un entorno.

Su diseño modular está inspirado de un sello prehispánico de una flor, como un elemento de líneas compositivas radiales y concéntricas, cuyas formas más primitivas nos evocan a las flores, asociadas también al sol.

El plafón tiene como función la señalética, busca organizar las diferentes instalaciones del Museo, aportando una juego de diferentes alturas bajo un mismo sistema de reticulado, donde cada una de las instalaciones se posiciona en un nivel distinto evitando así su interferencia entre conexiones, las cuales bajan a los diferentes niveles donde se sitúan las placas con los relieves concéntricos que conforman el sistema plafonado. Estos círculos nos indican las diferentes instalaciones que puede albergar, considerando para ello un diámetro diferente en cada salida: el círculo más pequeño da salida a los sensores de fuego, la siguiente a luminarias, una de las más grandes al aire acondicionado, etc.

El recorrido enmarcado en un camino luminoso, con la finalidad didáctica un recorrido intuitivo lleno de estímulos visuales que tienen como objetivo permear en el visitante un sentido nacionalista, a través del conocimiento de su historia colectiva.

La concepción general de los plafones con la finalidad de resolver los distintos retos que representaba el proyecto como: la educación, la transferencia de conocimiento, el analfabetismo, el desconocimiento de la lengua española, la incorporación de diversas tecnologías para la construcción del Museo y el tiempo limitado; dirigieron intuitivamente a los especialistas del Museo a usar a la señalética como una herramienta de eficaz comunicación. Sin verlo considerado, debido que los primeros proyectos de señalética en México se dieron varios años después, estos especialistas sentaron los primeros antecedentes de la señalética aplicada a la educación, a través del recorrido histórico de una cultura dentro de un Museo.



Figuras 10, 11 y 12. Sala de orígenes.
Dioramas y contextualización de los conceptos © Patricia Torres, 2014

Lo más destacable es la vigencia del plafón como un elemento de la señalética, para el recorrido y en consecuencia para la educación y el conocimiento. Ya que hoy las instituciones educativas están en un proceso de transformación, cuestionando la educación tradicional, los estudiantes del hoy habituados a un sin número de estímulos han llevado a plantear modelos enfocados a las experiencias significativas, consistentes en conectar con todos los sentidos al estudiante con el conocimiento; por ello hoy su vigencia es contundente al ofrecer un modelo de enseñanza vivencial que guía a las personas por su propia historia, estimulando sensiblemente al visitante.

Cabe mencionar que esto puede considerarse como una parte fundamental en la experiencia de enseñanza a través de los Museo, ejemplos como el Museo de la Ciudad de Londres, construido 11 años posteriores al MNA, desde hace varios años muestran una considerable evolución en la experiencia del recorrido, integrando estímulos que impactan todos los sentidos del espectador.

## ACÚSTICA

Uno de los elementos para la percepción en el recorrido es la acústica; que si bien su importancia no era considerada indispensable para la concepción del Museo, a diferencia de espacios arquitectónicos como: teatros y salas de música, tomada en cuenta desde los tiempos de los griegos y los romanos.

La acústica en el museo, dada por los materiales en piso, muros y plafones juega un papel importante, creando un ambiente y una atmósfera que expone al visitante a una gran variedad de reflexiones similares a las que se producen en una catedral o una iglesia, ya que al igual que ellas, el museo posee un tiempo de reverberación alto. Que estimula las sensaciones al estar en constante contacto con las ondas sonoras.

Corroborado con el tiempo de reverberación (TR) de las salas de exposición, que es de: 2.3 segundos, *"similar la recomendada para espacios conde se escucha música coral y sacra".* [4]

4 (Distancia, 2014) Tiempo de Reverberación y Coeficiente de absorción. <<Esta propiedad acústica de los espacios arquitectónicos. Representa el tiempo (segundos) que toma a las reflexiones del sonido dentro de un espacio, indicando la calidad del sonido. El TR es proporcional al volumen espacial, e inversamente proporcional al material de absorción de sonido con que cuenta un espacio.>>

Para este efecto, el plafón de las salas de exposición se construyó con lámina perforada calibre 20, que se complementaba con una capa de lana mineral en su parte superior, de 25 mm de espesor hecha de fibra de vidrio, cubierta con una hoja de papel Krafft.

Esta capa de borra aislante con el tiempo fue sustituida, debido a las altas concentraciones de polvo y de bacterias, nocivas para los visitantes y la conservación de las piezas. Su sustitución se hizo por piezas de fieltro, que son perforadas para dejar el paso de las instalaciones, considerando también cuadrados completos que cubren en su totalidad la lámina.

## CONCLUSIÓN

Por ello es de vital énfasis que los especialistas que concibieron el MNA hace más de medio siglo, fueron capaces de anticipar tendencias y una experiencia educativa, donde cada uno de las decisiones del museo representa puntos de contacto con el visitante, enfatizando así la experiencia. Enseñando con los sentidos, en un recorrido reflexivo sobre su pasado y su propio comienzo. Siendo parte de una experiencia de aprendizaje vivencial, sobre su origen y su relación con su cultura. Considerando la acústica de las salas, un factor estimulante para la creación de experiencias de aprendizaje.

Como un ejemplo claro de la vigencia de estos conceptos de aprendizaje y de la anticipación de tendencias educativas de los especialistas que concibieron el Museo, el Tecnológico de Monterrey, desarrolló su nuevo modelo educativo TEC21, basado en Retos y Experiencias significativas. "*TEC21*"[5], es un innovador modelo educativo adaptado a los nuevos tiempos, se basa en tres pilares: experiencias de aprendizaje retadoras e interactivas, flexibilidad y los profesores. Por ello no cabe más que reforzar que el MNA representa la primera experiencia de aprendizaje a través de un Museo, siendo una experiencia de aprendizaje vivencial actual y completamente contemporáneas, que la visión que tuvieron hace más de cincuenta años al concebirlo como un espacio para educar, es vigente y anticipo tendencias educativas. Donde su concepto museográfico y su recorrido a través de la señalética de sus plafones son utilizados hoy en día en el museo más destacado de Europa.[6]

## BIBLIOGRAFÍA

- Costa, J. (1987). Señalética. Barcelona: Costa Punto Com Editor.
- Daumal i Domènech, F. (2007). Arquitectura Acústica, 3. Rehabilitació. Edicions UPC. Barcelona
- Distancia, U. N. (07 de 07 de 2014). Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208042/Contenido_en_linea/leccin_39__tiempo_de_reverberacin_y_coeficiente_de_absorcin.html
- Enciso, J. (1953). Design motifs of ancient Mexico. New York: Dover Publications.
- Informativa, I. E. (17 de 2 de 2014). SNC. Obtenido de Portal Informativo: http://www.itesm.mx/wps/wcm/connect/snc/portal+informativo/por+tema/educacion/modelotec21_17feb14

5 (Informativa, 2014) Presentan Modelo Tec 21 a Consejeros del Tecnológico de Monterrey << *Experiencias de aprendizaje retadoras e interactivas*. **Las experiencias de aprendizaje tienen la capacidad de cautivar y motivar al alumno y no solo ocurren en el salón de clase, sino que siguen sucediendo fuera de él. Una manera de proveer esas experiencias altamente retadoras**., *Flexibilidad en el proceso de enseñanza-aprendizaje.* En el currículo y flexibilidad también en el cómo, cuándo y dónde se realizan las experiencias de aprendizaje, y en los elementos de aprendizaje que le ayudan al alumno a confirmar sus conocimientos. *Los profesores*. Con cinco atributos fundamentales: Son inspiradores, tienen vanguardia en su disciplina, son innovadores, están altamente vinculados con las actividades de su profesión y utilizan la tecnología hábilmente. >>

6 (Ventosa, 2015) *"El cos vestit. Siluetes i moda (1550-2015)" Museu del Disseny de Cataluña en Barcelona.*

- Ramírez Vazquez, P. (1968). El Museo Nacional de Antropología (Vol. Colección: La Ciudad Contemporánea). México D. F.: Editorial Tláloc, S. A.
- Rangel Guerra, A. (2002). El pensamiento de Jaime Torres Bodet: Una visión humanista de la educación de adultos. Revista Interparamericana de educación de adultos. CREFAL.
- Ventosa, S. (1 de 7 de 2015). Obtenido de Museu del Disseny de Barcelona: http://pleiades.cbuc.cat/record=b1408157~S3*cat
- Torres Sánchez, Patricia, Un viaje en el tiempo: El museo nacional de antropología de la Ciudad de México en 1964. Análisis e interpretación del proceso didáctico, proyectual y constructivo del museo. Señalética en el diseño de los plafones: innovación y vigencia. Tesis doctoral. Barcelona (próxima defensa a finales del 2015)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# PERCEPCIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA DE PARQUES Y JARDINES

PACS: 43.50.Qp

Barrigón-Morillas, Juan M.[1*]; Venegas-Jiménez, Carmen[1]; Medina-Bonilla, Diego[1]; Méndez-Sierra, Juan A.[1]; Atanasio-Moraga, Pedro[1]; Rey-Gozalo, Guillermo[2]; Vílchez-Gómez, Rosendo[1]; Maderuelo-Sanz, Rubén[1].

[1] Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España
Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03
E-mail: barrigon@unex.es

[2] Universidad Autónoma de Chile, 5 Poniente 1670,
3460000 Talca, Región del Maule, Chile;
E-mail: greyg@uautonoma.cl

## ABSTRACT

We present a study in different parks, promenades and gardens of the city of Caceres with variable characteristics between them. Simultaneously, we have made: 1) sound level meter measures; 2) measures and binaural recordings by Noise Book; and 3) surveys to users of the studied environments. Finally, we have measured sound levels and psychoacoustic parameters and we has collected the perception of users on the characteristics of the environment and of the noise and its effects. We present here analysis of the relationships found between different perceptions indicated by users and between noise levels and the responses to the survey.

## RESUMEN

Presentamos un estudio realizado en diferentes parques, paseos y jardines de la ciudad de Cáceres con características variables. Simultáneamente se han realizado: 1) medidas mediante sonómetro; 2) medidas y grabaciones binaurales mediante el equipo Noise Book; y 3) encuestas a usuarios de los entornos estudiados. Finalmente, se han medido niveles sonoros y parámetros psicoacústicos y se ha recogido la precepción de los usuarios sobre las características del entorno y sobre el ruido y sus efectos. Presentaremos análisis de las relaciones encontradas entre diferentes percepciones indicadas por los usuarios y entre los niveles sonoros y las respuestas obtenidas en las encuestas.

## INTRODUCCIÓN

La percepción del sonido ha sido una cualidad que ha estado siempre presente en la vida del hombre. Esta capacidad hace posible la comunicación entre las personas, nos permite reaccionar ante diferentes estímulos; e incluso, a veces, nos puede provocar una sensación placentera. Sin embargo, esto no siempre es así. Si los niveles de ruido y el tiempo a los que está expuesta una persona superan un cierto umbral, pueden provocar molestias, tanto físicas como psicológicas, e incluso pueden afectar de manera negativa a la salud del individuo [1].

Dependiendo del área geográfica y socioeconómica, las fuentes de ruido que principalmente se encuentran presentes en nuestro entorno irán variando. Pero para hacernos una idea general, se puede concluir que casi el 80% de los ruidos provocados en un núcleo urbano lo son por los vehículos circulando por sus calles y carreteras, seguidos de un 10% de las industrias. Otras fuentes a destacar son el ferrocarril, transporte aéreo y, de manera destacada, fundamentalmente en horario nocturno, el originado por actividades de ocio [2].

Por otra parte, podemos encontrarnos otras zonas o espacios abiertos con características muy diferentes a las que existen en los núcleos urbanos. Hablamos de paisajes rurales o zonas naturales, donde la tranquilidad es una de sus principales características. En ellos también existen muchas fuentes sonoras, pero la sensación que producen, con respecto a un núcleo urbano, son diferentes. Podemos encontrar sonidos de múltiples tipos de animales (mamíferos, aves…), sonidos relacionados con el agua (arroyos, fuentes…) otros sonidos naturales, como el viento, etc. En las ciudades, determinados ambientes, como parques, jardines y plazas, son los entornos que más se acercan a aquellos paisajes rurales y naturales [3-6].

Presentamos un estudio realizado en diferentes parques, paseos, plazas y jardines de la ciudad de Cáceres con características variables. Se mostrarán análisis de las relaciones encontradas entre diferentes percepciones indicadas por los usuarios y entre los niveles sonoros y las respuestas obtenidas en las encuestas.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Ciudad bajo estudio

Cáceres se encuentra situada al oeste de España, en la comunidad autónoma de Extremadura. Su conjunto medieval fue declarado Ciudad Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1986. Es la capital de provincia y cuenta con una población cercana a los 100.000 habitantes, siendo la ciudad más grande y poblada de su provincia. La ciudad representa el principal centro comercial, administrativo y eje económico del entorno, además de ser el primer centro turístico. Su economía se basa básicamente en el sector terciario (servicios), especialmente en el turismo y la construcción.

### Selección de los entornos bajo estudio

Tomando como referencia los parques, plazas y zonas de paseo de la ciudad, normalmente utilizados por los ciudadanos para actividades relacionadas con el ocio y la relajación, se consideraron nueve zonas bajo estudio (Fig. 1), que podríamos agrupar en cuatro grupos:

- El primer grupo constará de parques grandes. Dos son los parques que podrían entrar en esta categoría: el Parque del Príncipe y el Parque del Rodeo.
- En el segundo bloque consideraremos parques medianos o intermedios. Fueron seleccionados el Parque de la Mejostilla, el Parque Padre Pacífico y el Parque de San Blas.
- El tercero grupo bajo estudio serán los “paseos”, donde nos encontramos con Cánovas y la zona de parque existente en la Avenida de Alemania.
- El último grupo está formado por pequeñas plazas. Fueron seleccionadas la Plaza de Italia y la Plaza de Colón.

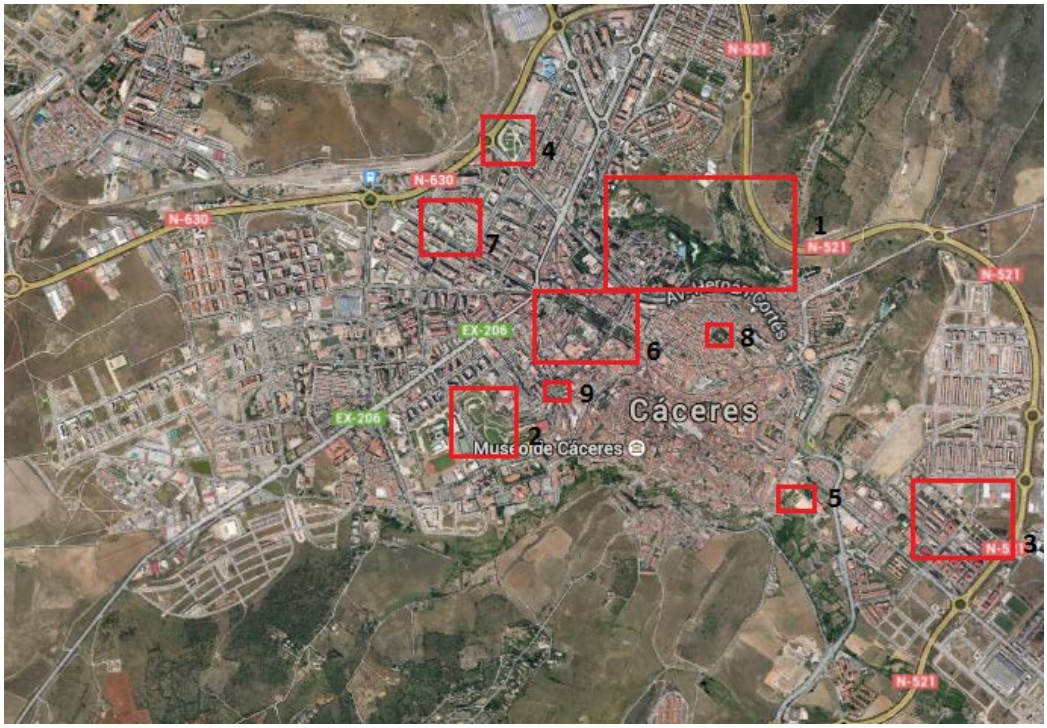



*Figura 1 Localización de las zonas bajo estudio.1. Parque del Príncipe; 2. Parque del Rodeo; 3. Parque de la Mejostilla; 4. Parque Padre Pacífico; 5. Parque de San Blas; 6. Paseo de Cánovas; 7. Avenida de Alemania; 8. Plaza de Italia; 9. Plaza de Colón.*

**Elección de los puntos de medida**

El número de puntos de medida, grabación y encuesta seleccionado en cada parque, plaza o paseo vino determinado por la extensión de la zona estudiada. El número mínimo fue de 2, lo que ocurrió en las plazas y el máximo de 10, que correspondió al Parque del Príncipe.

**Recogida de datos: medidas, grabaciones y encuestas**

**Medidas y grabaciones**

Para la realización de las medidas hemos utilizado, en primer lugar, el Sonómetro 2238 mediator de B&K. Estas medidas tuvieron una duración de diez minutos. Simultáneamente, hemos realizado medidas y grabaciones binaurales mediante el sistema *Noise Book de Head Acoustics,* con una duración de 3 minutos. Se hicieron dos medidas-grabaciones por cada uno de los puntos seleccionados. Una de ellas se hace en horario de mañana (entre las 10:00 am y las 14:00 am), y la otra se graba en horario de tarde (entre las 17:00 pm y las 21:00 pm). Además, la distancia de estos puntos a la fuente sonora no será la misma para todos los parques, sino que irá variando en función de la intensidad y sonoridad. Todas las medidas-grabaciones se realizaron entre los meses de septiembre y octubre con una meteorología favorable.

**Encuestas**

Alrededor de los momentos en los que se realizaron las medidas-grabaciones, se pasaron una serie de encuestas a los transeúntes o personas que se encontraban en el momento de la grabación cercanos al punto bajo estudio. Fueron realizadas, aproximadamente, unas seis encuestas por cada punto de medida. En total 198 encuestas. La proporción media de personas dispuestas a colaborar fue algo inferior al 50 %, ya sea porque las personas indicaban falta de tiempo o de interés. En todo momento se intentó seleccionar una muestra de

la población bajo estudio que cubriese los diferentes rangos de edad, sexo o nivel cultural. A todas ellas se les hicieron las mismas preguntas, en el mismo orden y en una situación similar.

La encuesta utilizada se compone de diferentes apartados: **a) Presentación:** se indican datos sobre el organismo responsable de la encuesta y el proyecto en el que se encuadra. **b) Control y ubicación:** esta sección se suele rellenar por el encuestador, para tener un orden y un control geográfico y temporal de las encuestas. **c) Datos del encuestado:** se recoge la información sociológica: edad, sexo, estado civil, nivel de estudios, situación laboral y ocupación actual. **Características del entorno:** Medida de la satisfacción con las características del parque. **Respecto al ruido:** Medida de la perturbación experimentada por el encuestado de diferentes fuentes sonoras. **Efectos del Ruido:** Evaluación del grado de afectación originado por el ruido existente en el parque. Se valoran, en particular diferentes actividades que puedan ser perturbadas, diferentes efectos que puedan ser ocasionados o diferentes acciones que puedan ser inducidas. **Usos del parque:** Grupo de cuestiones encaminadas a conocer la frecuencia, la forma y las causas que motivan el uso del parque por parte de la persona encuestada. **Respecto al agua:** se pide al encuestado que indique la percepción de fuentes sonoras relacionadas con el agua y que valore algunas percepciones relacionadas con el ambiente mediante el empleo de diferencias semánticas.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Situación acústica de los parques

En la Tabla 1 presentamos una visión general de la situación acústica de cada parque, paseo o plaza estudiada. Para ello, mostramos los valores medios y las desviaciones típicas de variables acústicas seleccionadas medidas con el 2238 Mediator de B&K. Estos valores se han obtenido empleando como referencia los resultados de las medidas alrededor de los momentos en los que se han realizado las encuestas a cada persona.

***Tabla 1:*** *Magnitudes objetivas obtenidas para los nueve entornos estudiados. Se muestran los valores medios y las desviaciones típicas del nivel equivalente, el nivel máximo y el nivel mínimo.*

| Magnitud | $L_{Aeq}$ | | $L_{AMAX}$ | | $L_{AMIN}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Unidades | dBA | dBA | dBA | dBA | dBA | dBA |
| *1.-Parque del Príncipe* | 59,1 | 5,1 | 75,2 | 4,5 | 53,8 | 6,4 |
| 2.-Parque del Rodeo | 59,5 | 8,5 | 76,7 | 8,4 | 52,1 | 11,0 |
| 3.-Paseo de Cánovas | 68,5 | 3,1 | 86,3 | 3,8 | 62,3 | 3,2 |
| 4.- Paseo Av. Alemania | 59,9 | 2,9 | 73,6 | 4,5 | 47,9 | 4,0 |
| 5.- Parque de San Blas | 54,9 | 1,9 | 73,6 | 2,0 | 43,8 | 1,5 |
| 6.- Parque de la Mejostilla | 64,8 | 7,1 | 81,3 | 10,5 | 53,7 | 8,1 |
| 7.- Parque Padre Pacífico | 67,9 | 9,9 | 77,6 | 7,1 | 64,6 | 11,3 |
| 8.-Plaza de Colón | 64,7 | 2,3 | 82,0 | 3,6 | 54,0 | 1,7 |
| 9.-Plaza de Italia | 58,1 | 1,4 | 76,6 | 2,2 | 48,9 | 3,2 |
| Global (sobre medidas) | 60,8 | 7,2 | 76,9 | 7,0 | 53,4 | 9,2 |

Podemos deducir de los datos mostrados en la Tabla 1 que, en general, los valores medidos del nivel equivalente son relativamente elevados, superándose con facilidad el valor de referencia de 60 dBA en la mayoría de los entornos estudiados en muchas de las medidas realizadas. Podrían, únicamente, resaltarse dos entornos por los valores obtenidos. En primer lugar, nos centramos en el valor obtenido en el Parque de San Blas, con un nivel equivalente

medio inferior a 55 dBA. La pequeña desviación obtenida de este valor medio es un indicio que nos indica que en ninguna medida se han superado los 60 dBA. En segundo lugar, nos fijamos en los valores mostrados para la plaza de Italia. Vemos con el valor medio es inferior a 60 dB, con una desviación muy baja. En realidad, en este entorno, aunque nos acercamos al valor de referencia de 60 dBA, en ninguna de las medidas realizadas, el nivel equivalente medido ha superado ese valor.

En segundo lugar fijaremos nuestra atención en los resultados obtenidos para el valor medio del nivel equivalente de 60 dBA, aproximadamente. Alrededor de este valor encontramos los grandes parques de la ciudad, Parque del Príncipe y Parque del Rodeo y una de las zonas que hemos considerado como paseo, la existente en la Avenida de Alemania. Finalmente, con valores creemos que elevados, superando el nivel equivalente el valor medio de 65 dBA o muy próximo a él, se encuentran la Plaza de Colón, el Parque Padre Pacífico y el Paseo de Cánovas.

**Resultados de la encuesta**

En primer lugar se les preguntaba a los usuarios de los entornos estudiados sobre su grado de satisfacción sobre determinadas características del mismo y sobre su grado de satisfacción global del entorno. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. En la primera columna de la tabla se muestran los aspectos sobre los que se ha pretendido conocer la valoración que las personas hacen de ellos. En la segunda columna se muestran los valores medios globales que se han obtenido y en la tercera la desviación típica.

***Tabla 2:*** *Valoración de 0 (nada) a 4 (mucho) de las diferentes características de los entornos estudiados.*

| Característica | Promedio | Desviación |
|---|---|---|
| **Limpieza** | 2,96 | 0,64 |
| **Aire** | 2,67 | 0,79 |
| **Ruidos** | 2,41 | 0,90 |
| **Estética** | 3,14 | 0,73 |
| **Seguridad** | 3,55 | 0,59 |
| **Relaciones** | 2,99 | 1,06 |
| **Conservación** | 3,14 | 0,58 |
| **Situación** | 3,67 | 0,52 |
| **Tamaño** | 3,48 | 0,67 |
| **Sombras** | 3,15 | 0,87 |
| **Arboleda** | 3,16 | 0,83 |
| | | |
| **Global** | 3,10 | 0,80 |

Podemos observar como la mayoría de las características analizadas y, asimismo, la valoración global, puede considerarse, en promedio, bastante buena. Es interesante observar que, únicamente los ruidos poseen una valoración en la medida del nivel de satisfacción de las personas encuestadas que se acerca más a “regular (2)” que a “bastante (3)”.

Desde un punto de vista de gestión de un parque o entorno tranquilo de una ciudad, resulta de interés conocer aquellas características de estos entornos que poseen una mayor influencia en la percepción del usuario y en la valoración que hace de este entorno.
Con este objetivo, planteamos un análisis de regresión entre lo indicado por los encuestados para la satisfacción sobre cada una de las características empleadas en este estudio y la

satisfacción global. En la tabla 3 presentamos los resultados obtenidos. En la primera columna de la tabla se muestran los aspectos considerados. En la segunda columna se muestran los valores que se han obtenido para la tau de Kendall y en la tercera su nivel de significación.

***Tabla 3:*** *Resultados del análisis de relación lineal entre algunas características de los entornos analizados y la valoración global del entorno.*

| Característica | Tau de Kendall | Significación |
|---|---|---|
| **Limpieza** | 0,389 | *** |
| **Aire** | 0,441 | *** |
| **Ruidos** | 0,462 | *** |
| **Estética** | 0,383 | *** |
| **Seguridad** | 0,221 | *** |
| **Relaciones** | 0,156 | * |
| **Conservación** | 0,364 | *** |
| **Situación** | 0,136 | * |
| **Tamaño** | 0,308 | *** |
| **Sombras** | 0,352 | *** |
| **Arboleda** | 0,338 | *** |

Observemos en la tabla 3 cómo, para todas las variables analizadas, encontramos la existencia de relaciones significativas entre la satisfacción con esa característica y la satisfacción global que las personas poseen del entorno bajo estudio. Y que, en muchas de ellas, las relaciones encontradas posee un elevado nivel de significación. Aunque creemos que es muy interesante observar cómo las dos características analizadas menos relacionadas con las características del propio entorno bajo análisis, como son el grado de satisfacción con las relaciones con los otros usuarios del parque y como es la situación del parque respecto a la ciudad, son las que presentan el menor nivel de significación.

***Tabla 4:*** *Molestia media percibida para cada una de las fuentes analizadas y valoración del ruido como agente contaminante. Valoración de 0 (nada) a 4 (mucho).*

| Característica | Media | Desviación |
|---|---|---|
| **obras** | 0,37 | 0,64 |
| **voces** | 1,22 | 0,75 |
| **ladridos** | 0,87 | 0,87 |
| **limpieza** | 0,64 | 0,75 |
| **trafico** | 1,37 | 1,02 |
| **niños** | 1,03 | 0,99 |
| **agua** | 0,41 | 0,68 |
| **ruido agente contaminante** | 2,56 | 0,93 |

Además, en el marco de un estudio sobre paisaje sonoro, sobre las características acústicas de los entornos analizados y sobre los efectos del ruido, es de gran interés resaltar como la ausencia de ruidos es la característica que presenta una más elevada explicación de la variabilidad del grado de satisfacción global con el entorno. Por encima, incluso, de características tan importantes como pueden ser, la calidad del aire, la limpieza o la estética del entorno. Queda fuera de este estudio analizar si estas valoraciones poseen una dependencia

con variables sociológicas, como sexo, edad o nivel de estudios, aunque este análisis pueda conducir a resultados de interés.

A continuación, en la encuesta, hemos analizado la molestia o perturbación que diferentes fuentes sonoras han ocasionado en los usuarios de los diferentes entornos bajo estudio. En la tabla 4 presentamos la molestia percibida relativa a diferentes fuentes sonoras analizadas. Puede observarse en la tabla como la molestia o perturbación ocasionada por las diferentes fuentes estudiadas es bastante baja. Sólo la ocasionada por voces y tráfico se encuentra entre poco y regular. En cambio, la valoración del ruido como agente contaminante, encuentra una valoración entre regular y bastante.

Finalmente, en esta comunicación, vamos a analizar las posibles relaciones existentes entre la molestia percibida en función de la fuente analizada y dos variables. Una de ellas, subjetiva, la satisfacción con la ausencia de ruidos y la otra objetiva, los valores de los niveles sonoros medidos en instantes alrededor de los momentos en los que las encuestas se realizaron.

En la tabla 5 mostramos los resultados encontrados para el primer grupo de relaciones. Podemos observar cómo, en general, se encuentra una relación inversa significativa entre la molestia ocasionada por las diferentes fuentes sonoras analizadas y la percepción de la satisfacción de la ausencia de ruidos. No encontrándose relación con la percepción del ruido como agente contaminante. Es interesante remarcar que son precisamente el tráfico y las voces las dos fuentes sonoras que presentan un mayor grado de relación y que, en particular, la molestia ocasionada en las zonas estudiadas por el ruido de tráfico, por sí sólo, permite explicar, individuo a individuo, un 32 % de la variabilidad de la percepción de la satisfacción con la ausencia de ruidos.

***Tabla 5:*** *Resultados del análisis de relación lineal entre la satisfacción mostrada con la ausencia de ruidos en el entorno estudiado y la molestia ocasionada por algunas fuentes sonoras.*

| Característica | Tau de Kendall | Significación |
|---|---|---|
| **obras** | -0,197 | ** |
| **voces** | -0,294 | *** |
| **ladridos** | n.s. | |
| **limpieza** | -0,127 | * |
| **trafico** | -0,567 | *** |
| **niños** | -0,127 | * |
| **agua** | -0,144 | * |
| **ruido agente contaminante** | n.s. | |

En la tabla 6, mostramos los resultados encontrados para el segundo grupo de relaciones. Observamos cómo, en este caso, para un análisis individuo a individuo, en la mayoría de los casos, no encontramos relaciones significativas con el nivel equivalente. Es de destacar, en primer lugar, que si encontramos una relación significativa inversa con la satisfacción percibida con la ausencia de ruidos. Además, encontramos relaciones significativas con la molestia ocasionada por dos fuentes sonoras, ladridos y tráfico. Siendo altamente significativa la encontrada con el tráfico. Finalmente, también encontramos una relación significativa del nivel equivalente medido y la percepción del ruido como agente contaminante. Es de resaltar que es normal que cuando se analizan relaciones entre percepciones de encuestados y niveles sonoros, individuo a individuo, sin promediar por intervalos, la explicación de la variabilidad suele ser bastante baja.

***Tabla 6:*** *Resultados del análisis de relación lineal entre la satisfacción mostrada con la ausencia de ruidos, la molestia ocasionada por algunas fuentes sonoras y la percepción del ruido como agente contaminante con el nivel equivalente medido alrededor del momento en el que se hizo la encuesta.*

| Característica | R de Pearson | Significación |
|---|---|---|
| **Satisfacción ruidos** | -0,134 | * |
| **obras** | 0,052 | n.s. |
| **voces** | 0,043 | n.s. |
| **ladridos** | -0,140 | * |
| **limpieza** | 0,012 | n.s. |
| **trafico** | 0,152 | ** |
| **niños** | -0,028 | n.s. |
| **agua** | 0,097 | n.s. |
| **ruido agente contaminante** | 0,127 | * |

## CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de percepción de los efectos del ruido y del paisaje sonoro en nueve entornos de la ciudad de Cáceres normalmente utilizados para la relajación y el descanso. Los niveles sonoros medidos, en algunos casos, superarían la referencia de 60 dBA, lo que implicaría niveles sonoros inadecuados para el uso indicado.

Se han encontrado relaciones significativas entre la satisfacción con el ruido existente en estos entornos y la satisfacción global. Además, también hemos encontrado relaciones significativas entre los niveles sonoros medidos y la satisfacción o la molestia ocasionada por diferentes fuentes.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).




## BIBLIOGRAFÍA

[1] WHO. Guidelines for community noise. World Health Organization, Geneva, Switzerland; 1999.
[2] WHO. Berglund B, Lindvall T (Eds). Community noise. World Health Organization, Stockholm: Stockholm University and Karolinska Institute; 1995.
[3] de Coensel B, Botteldooren D. The quiet rural soundscape and how to characterize it. Acta Acust 2006;92:887–97.
[4] Lam KC, Brown AL, Marafa L, Chau KC. Human preference for countryside soundscapes. Acta Acust 2010;93:463–71.
[5] Brambilla G, Gallo V, Asdrubali F, D'Alessandro F. The perceived quality of soundscape in three urban parks in Rome. J Acoust Soc Am 2013;134:832–39.
[6] Barrigón-Morillas, Juan Miguel et al. Paisaje sonoro en entornos naturales: Monfragüe. Tecniacustica, 2013. Valladolid.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONFORTO ACÚSTICO
# A PERCEPÇÃO DO UTILIZADOR COMUM

PACS: 43.10

André Guerreiro[(1)]; Carlos César Rodrigues[(2)]
[(1)] Abalg - Arquitectura e Design, Lda; [(2)] Instituto Superior Engenharia Lisboa
[(1)] Travessa da Quinta Nova, 4; 7600-093 Aljustrel; Portugal; Tel: (+351) 914113800; aguerreiro85@gmail.com
[(2)] Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; crodrigues@adf.isel.pt

## ABSTRACT

The awareness of the importance of comfort provided by buildings has been proving to be increasingly decisive for the user's choice.

Being Acoustics one of the main vectors responsible for the feeling of comfort, the authors of this paper consider that it is highly relevant to assess how the average user perceives the acoustic comfort of a given space.

Assuming that form, materials and function are key characteristics of a building's acoustic behaviour and thus the inherent degree of building's comfort, the authors here discuss, in an exhaustive but rational way, the perception that the average user has of acoustic comfort.

## RESUMO

A consciencialização da importância do conforto proporcionado pelos edifícios tem vindo a revelar-se cada vez mais decisiva na escolha dos respectivos utilizadores.

Sendo a Acústica um dos principais vectores responsáveis pela sensação de conforto, os autores do presente artigo consideram ser de elevada relevância a avaliação do modo como o utilizador comum percepciona o conforto acústico de um determinado espaço.

Tendo como ponto de partida que a forma, os materiais e o uso do edifício são características determinantes do correspondente comportamento acústico e consequentemente do inerente grau de conforto, os autores propõem-se discutir, de modo exaustivo mas ponderado, a percepção que o utilizador comum tem do conforto acústico.

## 1. INTRODUÇÃO

Num momento em que o utilizador comum se encontra cada vez mais informado e consciente da importância da respectiva envolvente na sua percepção de conforto e consequente qualidade de vida, considera-se importante discutir de que modo o utilizador comum percepciona o conforto acústico.

No entanto, para além da percepção comum do conforto, o crescente grau de informação disponível sobre os edifícios é determinante na avaliação que o utilizador comum faz dos mesmos.

No presente artigo, procura-se questionar a definição de conforto acústico e a percepção do mesmo pelo utilizador comum, centrando a discussão no que respeita ao conforto acústico proporcionado pelo espaço construído.

Numa perspectiva de fornecer pistas para um crescente grau de informação disponível sobre a qualidade dos edifícios, pretende-se debater que formas existem de quantificar e interpretar o conforto acústico. Para esta discussão, recorre-se a exemplos da área da acústica de edifícios, mas também de outras áreas da acústica, no sentido de verificar se os estudos aplicados em diferentes áreas podem contribuir para compreender de que modo é possível avançar no estudo do conforto acústico em edifícios.

## 2. CONFORTO ACÚSTICO

Para a presente discussão, importa compreender a definição de conforto acústico e consequentemente enquadrar o conforto acústico numa definição mais geral de conforto.

Assim, importa destacar que o conforto acústico é parte de um conjunto maior. O primeiro aspecto que define a ideia de conforto é que este é o resultado do somatório de características e de parâmetros que, em conjunto, contribuem para uma percepção geral de conforto.

É de notar que a definição de conforto está directamente associada ao princípio básico e primordial da construção, isto é, de fornecer segurança aos indivíduos que utilizam o espaço construído e de promover as condições necessárias para que aí possam desenvolver de forma o mais adequada possível as suas mais diversas actividades.

Existem duas características essenciais na definição geral de conforto e que facilmente se podem identificar na definição de conforto acústico, que são a dependência do tipo de uso/função do espaço e a percepção por parte do utilizador.

Relativamente ao primeiro aspecto, destaca-se a ideia de que o grau de conforto de um espaço é sempre função do seu uso específico. Assim, quando se pensa em conforto, deve pensar-se se as características do espaço são as adequadas para a função, ou funções, para que foi construído.

Em termos acústicos, esta ideia é facilmente ilustrada quando se verifica a dificuldade de conferir características acústicas ideais a um pavilhão multiusos. Esta dificuldade resulta do facto da função do edifício ser tão variada e ter exigências acústicas tão divergentes que as características acústicas do espaço em causa tenderão sempre para valores médios/fracos e não para valores óptimos.

Por outro lado, a importância conferida ao facto de que a qualidade acústica de um espaço resulta, em grande parte, de uma "interpretação" por parte do utilizador, reforça a ideia de que a definição de conforto acústico é variável e sempre em função de algo.

Sendo a percepção do Ser Humano uma característica com um elevado grau de variabilidade e sendo o conforto acústico algo que é por ele percepcionado, é compreensível que a definição de conforto seja, em muitos aspectos, difícil de traduzir em expressões ou valores exactos.

Uma vez que se verifica a dificuldade de definir conforto acústico e consequentemente de o traduzir em valores exactos, é importante referir que uma possível definição de conforto acústico e da sua percepção será sempre uma aproximação a um valor ideal e nunca um valor exacto.

A qualidade acústica de um espaço está dependente, desde logo, da sua forma, mas também da escolha dos materiais e dos acabamentos, bem como das soluções construtivas implementadas.

Assim sendo, para se obter um bom desempenho acústico de um determinado espaço, é da maior importância o conhecimento, por parte do projectista de arquitectura, dos princípios básicos da acústica, uma vez que o correcto dimensionamento do espaço e da definição das soluções construtivas e dos materiais que as compõem será essencial na futura percepção do conforto por parte do utilizador comum.

Neste sentido, a crescente exigência da regulamentação aplicável a espaços construídos tem resultado num crescente grau de qualidade acústica, seja em edifícios novos seja em edifícios reabilitados.

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), publicado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio e alterado e republicado pelo Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho, identifica uma série de parâmetros acústicos regulamentares, de onde se destacam o $D_{2m,nT,w}$ (Índice de Isolamento Sonoro a Sons Aéreos de Fachadas), $D_{nT,w}$ (Índice de Isolamento Sonoro a Sons Aéreos entre Compartimentos), $L'_{nT,w}$ (Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Percussão) e $Tr$ (Tempo de Reverberação).

O facto de se utilizarem diferentes índices e diferentes valores limite para diferentes tipos de uso, revela uma adaptação dos critérios de conforto acústico aos diferentes espaços construídos.




Figura 1 – Ensaio acústico, *in situ*, para determinação dos parâmetros regulamentares

Mas, se por um lado, se pode concluir que o cumprimento do exigido no RRAE é um primeiro passo no sentido de se garantir um maior grau de conforto acústico, também é notório que o regulamento se foca essencialmente num aspecto específico da acústica de edifícios, o isolamento acústico.

No entanto, o conforto acústico engloba uma série de parâmetros acústicos com um maior grau de subjectividade que não tem expressão no RRAE.

Assim, seria interessante que a análise do comportamento acústico dos edifícios não se fizesse apenas pela vertente do RRAE, mas também através da tentativa de aproximação a valores ideais característicos de cada espaço, estando naturalmente consciente de que ao se referir valores ideais se pretende, tão somente, especificar um determinado padrão de conforto e não um valor exacto e inalterável.

Compreendendo a grande subjectividade que está associada à definição de conforto acústico, importa então compreender de que forma o utilizador comum o percepciona.

## 3. PERCEPÇÃO DO CONFORTO ACÚSTICO

Tal como discutido anteriormente a atenção do utilizador comum varia em função da utilização do espaço. Assim sendo, analisaremos, a título de exemplo, a diferença entre a percepção de conforto acústico numa habitação, num auditório e num restaurante.

Numa habitação, as preocupações são essencialmente ao nível do isolamento acústico, quer entre o exterior e o interior, quer entre pisos das diferentes fracções, ou ainda, de forma mais premente, entre fracções destinadas a habitação e fracções destinadas a comércio, serviços ou restauração.

Num auditório, a qualidade acústica do mesmo resulta, essencialmente, do modo como o som é transmitido à plateia, designadamente em termos da respectiva inteligibilidade.

Num restaurante, a percepção do conforto acústico está, de um modo geral, relacionada com a capacidade do espaço absorver o ruído ambiente, mantendo um nível sonoro que não seja considerado incomodativo para os seus utilizadores.

A percepção de um elevado grau de conforto acústico, acontece quando as condições acústicas do espaço/edifício sejam de tal forma ideais que o utilizador comum não encontra qualquer resistência, por questões acústicas, em desenvolver as suas actividades.

Para além de uma natural percepção de conforto acústico, que se prende com o facto de um espaço estar, ou não, a cumprir de forma eficaz o seu objectivo em termos acústicos, também a informação disponível e facilmente acessível para o utilizador comum da qualidade dos edifícios deve ser tomada em linha de conta.

## 4. AVALIAÇÃO DO CONFORTO ACÚSTICO

De modo a se avaliar o conforto acústico justifica-se a sua decomposição em duas áreas distintas mas complementares: a área quantitativa e a área qualitativa.

A área quantitativa está relacionada com a avaliação de índices e parâmetros acústicos, através de ensaios acústicos, *in situ*, devidamente orientados por normas nacionais e/ou internacionais.

A área qualitativa, de carácter significativamente subjectivo, está relacionada com a percepção de conforto acústico e é centrada na experiência humana do espaço.
Às características mais mensuráveis e às características mais subjectivas correspondem dois métodos de análise distintos, o método quantitativo e o método qualitativo, respectivamente.

O método quantitativo, que traduz características acústicas do espaço em parâmetros acústicos, tem, como exemplo, o cálculo do parâmetro *STI* (Speech Transmission Index) ou o parâmetro *Loudness*.

O método qualitativo tem, como exemplo, a gravação acústica com microfone binaural para simulação da qualidade acústica do espaço, sendo aquela gravação posteriormente analisada, de modo qualitativo, através de diversas questões sobre as características acústicas do espaço que são colocadas a um conjunto suficientemente alargado de indivíduos.

A utilização de dois métodos tão diferentes é de grande importância, tendo em consideração o elevado grau de subjectividade do conforto acústico, sendo que os parâmetros acústicos mais técnicos devem ser também apoiados em experiências reais que envolvam a percepção do conforto acústico por parte dos utilizadores.




Figura 2 – Teste qualitativo com microfone binaural

A Figura anterior ilustra um exemplo de um teste acústico qualitativo para a Orona, fabricante espanhol de elevadores, onde se pretende avaliar a percepção do conforto acústico pelos respectivos utilizadores. O teste compreende a gravação com microfone binaural de uma viagem de elevador e posterior audição por uma amostra relevante de utilizadores que fará a avaliação da gravação com base num questionário *ranking*.

Este tipo de avaliação tem como principal objectivo aumentar o conforto acústico dos utilizadores durante a viagem de elevador, o que é conseguido através do estudo, por amostragem, da percepção que cada utilizador tem dos níveis sonoros que ocorrem ao longo da viagem.

## 5. AVALIAÇÃO DO CONFORTO ACÚSTICO EM OUTRAS ÁREAS

O conforto acústico tem expressão numa vasta área para além da edificação.

De facto, para além da noção geral de que o conforto acústico está essencialmente relacionado com a correcta adequação das características acústicas de um espaço à sua função, é possível encontrar definições mais abrangentes de conforto acústico, como por exemplo considerar agradável o som produzido pelo motor de um automóvel, ou pelo escape de uma mota.

Reconhecer um determinado modelo de automóvel apenas pelo som emitido pelo respectivo motor, pode ser considerada uma questão de conforto, uma vez que existe uma sensação de bem-estar associada a um determinado som.

Neste sentido, as empresas tentarão ao máximo evitar que se perca, ou pelo menos que não se descaracterizem, determinadas características acústicas associadas aos seus produtos o que é possível conseguir através da realização de testes e ensaios acústicos devidamente adequados às situações em análise e aos resultados pretendidos.

Não é, então, estranho, que uma marca de cereais alimentares inclua nos seus estudos a caracterização acústica do seu produto. Por exemplo, uma marca que valorize a *crunschiness* do seu cereal, utiliza o método qualitativo com microfone binaural para poder testar a reacção do consumidor a vários graus de *crunschiness*, com o objectivo de tornar o seu produto final o mais apelativo possível.

Desta forma, se percebe que as qualidades acústicas são de tal modo abrangentes e subjectivas que o seu estudo só pode ser efectuado respeitando e reconhecendo as suas mais diversas características e a inerente relação com os respectivos utilizadores.

## 6. CONCLUSÕES

Uma vez que, de uma forma generalizada, se está a aprofundar e a aproximar a informação técnica da construção à percepção da qualidade e do conforto do espaço por parte do utilizador comum, é da maior importância que o vector conforto acústico acompanhe esta evolução.

Neste sentido, é convicção dos autores do presente artigo que uma maior integração da percepção/avaliação de conforto nos seus diversos vectores, resultará num maior grau de informação do utilizador comum, assim como numa melhoria mais abrangente da qualidade da construção.

Deverá ser, portanto, este o caminho a seguir, quer pelas autoridades legisladoras e fiscalizadoras, quer pelos projectistas acústicos, quer pelos utilizadores finais dos espaços construídos.

## 7. REFERÊNCIAS

Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# STRUCTURAL ANALYSIS AND CONTROL OF VIBRATING HOPPERS FOR HARVESTED GRAPES IN A WINE CELLAR: A CASE STUDY

PACS 43.40

V. Debut (1,2), O. Inácio (1)

(1) InAcoustics - Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente, Lda., R. Dr. Carlos Pires Felgueiras, 173 - 6.º B, 4470-157 Maia, Portugal

(2) Instituto de Etnomusicologia, Música e Dança, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 1069-061 Lisboa, Portugal

*vincentdebut@ctn.ist.utl.pt, octavio.inacio@inacoustics.com*

## Abstract

Excessive vibrations in the work environment not only harm exposed workers but can also affect the integrity of building structures. This problem was detected in a wine cellar in Alijó, Portugal, where a concrete slab is driven to resonance by two vibrating hoppers. In order to address the problem, a strategy combining physical modelling techniques and in-situ vibratory measurements have been developed. The general objective was first to reproduce the qualitative trends observed and then to assess the effectiveness of the proposed solution. The strategy developed here allowed to study how to decrease the vibration amplitude without making structural modifications on the slab, nor serious changes to the vibrating equipment.

## 1 Introduction

The Gran Cruz Winery is an industrial unit dedicated to centralize the production, storage and treatment of wines from Douro and Porto, located in northwest Portugal in Alijo. The project has represented a significant investment in the wine industry by including state-of-the art architectural and technological solutions for the transformation of grapes to wine ready for the market. For the reception and distribution of the harvested grapes to other equipments, the installation is equipped with two large vibrating hoppers. However, their operation has rapidly induced excessive floor vibrations so that their practical use has been severely limited. Indeed, the vibration problem is particularly critical for the installation since both hoppers are mounted on a flexible cantilevered concrete platform, with area of 150 $m^2$ and 30 cm thick, at 8 metre above groundfloor. The equipment has therefore been operated under sub-optimal conditions and until recently, an empirical but safe solution has consisted in changing the supply frequency of the electric motovibrators of the hopper in order to operate in a frequency range higher than the natural frequencies of the platform, thus decoupling the excitation from the slab response. However, it has been inevitable for the winery to address the vibration issue for both economical and safety reasons, and the main objective of this work is to describe the general developed strategy for the design of a reliable and robust solution which has been implemented at Gran Cruz very recently.

Of course, there has been many efforts devoted to the control of noise and vibrations in structures and today useful guidelines support mechanical engineers towards the design of adequate solutions regarding the equipement to protect [1]. Passive, active, semiactive, linear and nonlinear solutions have been developed

for vibration control but no universal solution currently exist. Indeed, the solving-capabiblities of every technique remain strongly dependent on the specifities of the problem in view of the resonance frequencies, the type of excitation and the environmental condition. For instance, it is well known that resonance problems can be controled by tuned-mass dampers (TMD) but the use of such devices is ill-adapted to flexible systems displaying a large number of modes and operating under broadband excitation.
The large vibrating hoppers of the winery can operate at several discrete frequencies by controlling the rotational speed of the motors while the excitation amplitude can be regulated by acting on the relative position of two eccentric masses inserted in the motors. Preliminary vibrational data has revealed the occurence of large amplitude vibratory responses of the slab for several operating speeds, the slab being driven to resonance phenomenom in the frequency range from 7 to 20 Hz. Among the technically applicable solutions, one simple approach to the problem would consist in changing the excitation frequencies as initially proposed by the hopper manufacters, so that the operating frequencies does not overlap with the modal frequencies of the structure. Other possible approach could be to alter the modal behaviour of the structure by structural modifications [2]. However, as already mentioned, the first solution is not sustainable for the winery since the hoppers operate optimally for specific motor speed while architects would certainly not give their permission for significant changes in the design and spatial options of their original plans. Furthermore, altering the modes of such a large structure would remain very challenging. TMDs could also be an efficient solution if only a single mode of the slab would become unstable. However, since resonance occurs at different rotational speed of the motor, this would imply the design and delicate tuning of several TMDs. The implementation of active control solutions [3] could also be attempted to adjust the operation of the control device. They can actually better regulate the dynamics response of the system than passive solutions but it is worth pointing that the practical feasibility of this modern control approach, using control transducers and signal processing techniques, could be delicate in such operating environment besides its rather complexity and expensive cost. It finally remains one common solution to takle efficiently the problem: isolate the machinery from the fondation by elastic decoupling [4].
In the present paper, we present the overall strategy developed in this work for the design of a passive solution to mitigate the resonance problem and demonstrate the practicability and effectiveness of an air spring isolation system. The approach combined experimental and numerical modal analysis, physical modeling and optimization of the isolator characteristics in view of ensuring the correct elastic decoupling of the hoppers and the slab over the range of the motor excitation frequencies.

# 2 In-situ experiments

## 2.1 Vibratory reponses of the slab

A first serie of measurements was concerned with the assessment of the actual vibratory responses of the slab under forced excitation. Accelerometers were glued on the slab at several critical locations, close to the hoppers feet and near the slab corners. Measurements were performed by step-increasing the running speed of the motor and for simplicity, one hopper only was operating at a time. For each velocity, ten accelerations signals were averaged in the frequency domain and recorded on a Spectral Dynamics digital acquisition board (Model SigLab 20-42). Fig. 1 displays the measured acceleration power spectra for one hopper. Although the slab response remains rather small for low frequencies of excitation, there is a net increase of the slab vibratory reponse in the frequency range between 12 and 18 Hz. From the vibrational standpoint, this typically illustrates a resonance effect of the flexible slab which responds to the forcing of the motor according to its natural modes of vibration. Therefore the objective of this work is to address the resonance issue without making structural modifications on the slab, nor serious changes to the vibrating equipment.

## 2.2 Experimental modal analysis

In a second stage, modal analysis measurements and computations have been performed to obtain detailed information about the natural frequencies and shape of the structural modes of the slab. Measurements consisted of driving-point transfer functions obtained by impact excitation at three locations on the slab

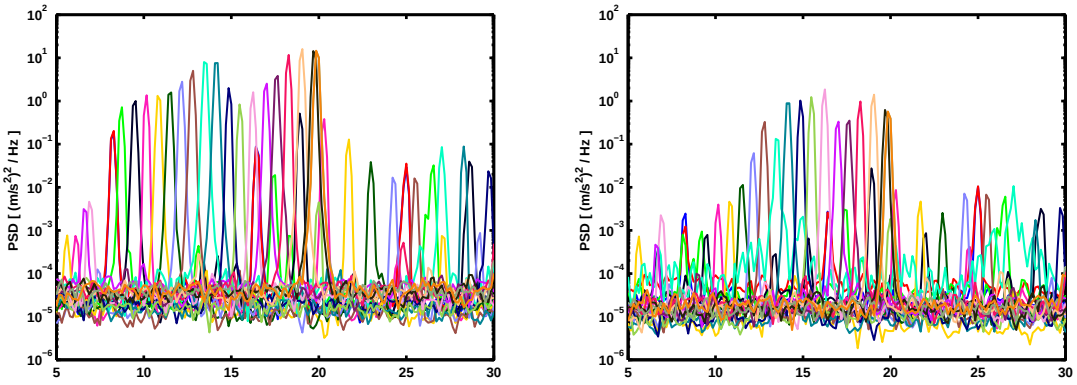



Figure 1: Power spectral density of the acceleration measured at the hopper foot (left) and slab corner (right) for the second equipment. Each color refers to one motor velocity.

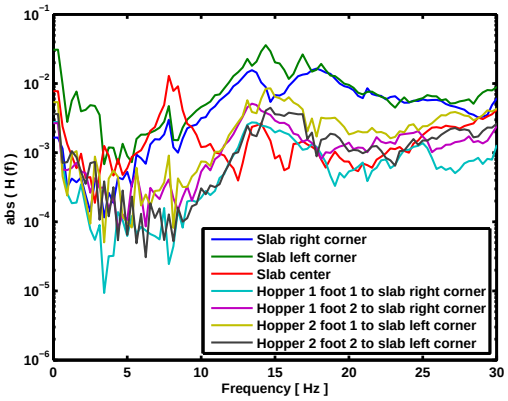



Figure 2: Transfer functions obtained by impact testing.

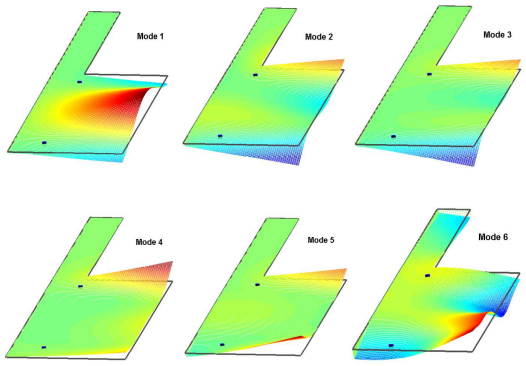
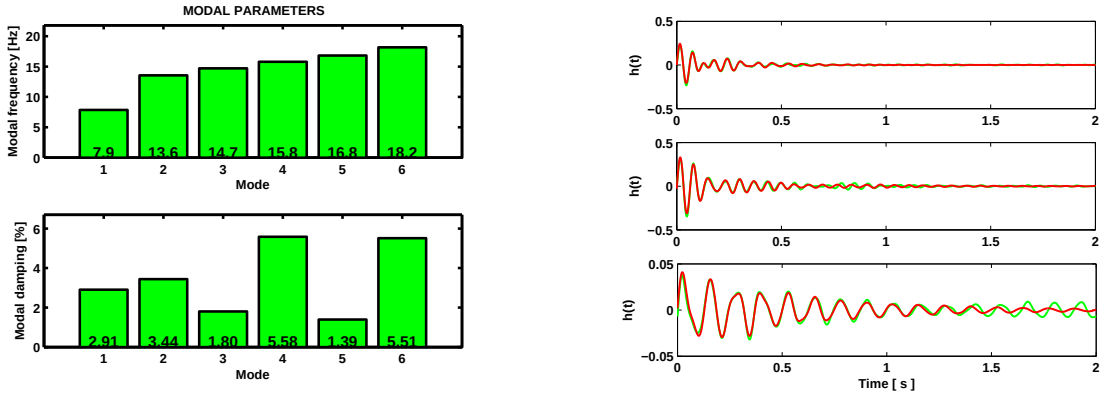



Figure 3: First six modes of the isolated slab computed by FEM. Dots refer as to the hopper contact points.

as well as other transfer functions performed between the hopper feet and slab. One accelerometer was used for measuring the concrete slab response while impact excitations were performed by using a large instrumented hammer to ensure a proper excitation of the low frequencies. The vibratory signals were recorded on the digital acquisition board and acquisitions were 3s-long. Fig. 2 displays the acquired transfer functions where several modes can be identified visually within the frequency range of the motor excitation. The slab modal frequencies and associated damping values have then been identified by implementing a sophisticated MDOF algorithm in the time-domain, the Eigensystem Realization Algorithm (ERA) which has been recognized as being very effective for the modal identification of complex systems [5, 6]. In essence, the algorithm is based on a state-space formulation of the system dynamics and attempts to identify a linear mathematical model to match the impulse responses of the structure, first by combining a set of free decay responses in the form of a generalized Hankel matrix and then, by using a singular value decomposition to estimate the minimum order of the mathematical model. The last step of the algorithm consists of computing the eigenvalues of the chosen minimum model from which the modal parameters of the system are extracted. Fig. 4 displays the identified modal parameters of the slab as well as a comparison between the measured and reconstructed impulse responses using the identified modal data to assess the successfull modal identification. Six modes have been identified in the frequency range 5 to 25 Hz, and two modes, slighlty damped, appear critical as they can easily contribute to the unsatisfactory operating performance.

Finite-Element analysis of the slab has also been performed to complete the knowledge of the modal




(a) (b)

Figure 4: Modal identification results: (a) Identified modal parameters ; (b) Measured (green) and reconstructed (red) impulse responses.

parameters, namely the mode shapes and the associated modal mass. A Finite Element software was used to construct the FEM model of the isolated slab and carry out the numerical computation. For illustration, Fig. 3 presents the mode shapes of the first six modes stemming from FEM computations. As a result, the modal parameters identified by modal analysis could then be used to feed a physical model, described in the next section, for prediction analysis purpose.

# 3 Physical modelling of the hoppers/slab coupled system

## 3.1 Equations of the model

For a simple analysis, the vibrating hopper can be idealized by two rigid masses $m_1$ and $m_2$ connected by an internal spring element, which responds to the external forcing provided by the motors. Its connection to the foundation which is provided by the vibration isolator to design, can be modelled by a elastic device with stiffness $k_s$ and damping coefficient $c_s$ and which contacts locally to the slab. To account for the complex vibrational behaviour of the fondation, the slab can be viewed as a multi-modal flexible structure whose modal parameters stem from the modal analysis. For simplicity, the equipment is assumed to vibrate in the vertical direction which is actually the predominant direction of motion. Schematically, the system under study is depicted in Fig. 5.

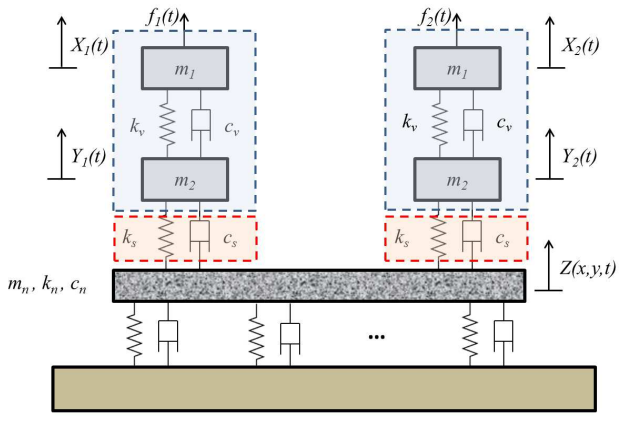



Figure 5: *Modelling of the coupled system: the two vibrating hoppers (blue), the two elastic vibration isolators (magenta) and the multi-modal flexible slab (gray).*

In a modal framework, the dynamics of the sub-systems can be described by:

- For the upper mass of the hoppers, subjected to the forces induced by the internal mount and the equipment motor excitation force $f_i(t)$ acting on hopper $i$ ($i$=1,2) :

$$m_1\ddot{X}_1(t) = -c_v\big[\dot{X}_1(t) - \dot{Y}_1(t)\big] - k_v\big[X_1(t) - Y_1(t)\big] + f_1(t) \tag{1a}$$

$$m_1\ddot{X}_2(t) = -c_v\big[\dot{X}_2(t) - \dot{Y}_2(t)\big] - k_v\big[X_2(t) - Y_2(t)\big] + f_2(t) \tag{1b}$$

- For the lower mass of the hoppers, subjected to the forces induced by the internal mount and the relative machinery/foundation displacement:

$$m_2\ddot{Y}_1(t) = c_v\big[\dot{X}_1(t) - \dot{Y}_1(t)\big] + k_v\big[X_1(t) - Y_1(t)\big] - c_s\big[\dot{Y}_1(t) - \dot{Z}(x_{c_1}, t)\big] - k_s\big[Y_1(t) - Z(x_{c_1}, t)\big] \tag{2a}$$

$$m_2\ddot{Y}_2(t) = c_v\big[\dot{X}_2(t) - \dot{Y}_2(t)\big] + k_v\big[X_2(t) - Y_2(t)\big] - c_s\big[\dot{Y}_2(t) - \dot{Z}(x_{c_2}, t)\big] - k_s\big[Y_2(t) - Z(x_{c_2}, t)\big] \tag{2b}$$

  where $x_{c_1}$ and $x_{c_2}$ are the points where the hoppers contact the slab.

- For the flexible slab, excited by the force $f(x, y, t)$ provided by the isolators:

$$m_n\,\ddot{q}_n(t) + c_n\,\dot{q}_n(t) + k_n q_n(t) = \int_S f(x, y, t)\,\phi_n(x, y)\,dS \quad n = 1, \ldots, M \tag{3}$$

  where $m_n$, $k_n$ and $c_n$ are the modal mass, stiffness and damping coefficient of mode $n$, with $\phi_n(x, y)$ the corresponding mode shapes and $q_n(t)$ its modal amplitude, and $S$ the surface of the slab. The external forces $f(x, y, t)$ come from the isolator spring and damping forces originated by the relative machinery/foundation motions at contact points $x_{c_1}$ and $x_{c_2}$. The associated modal forces are therefore expressed by:

$$\int_S f(x, y, t)\,\phi_n(x, y)\,dS = f(x_{c_1}, y_{c_1}, t)\phi_n(x_{c_1}, y_{c_1}) + f(x_{c_2}, y_{c_2}, t)\phi_n(x_{c_2}, y_{c_2}) \tag{4}$$

  where

$$f(x_{c_i}, y_{c_i}, t) = -k_s\Big[Z(x_{c_i}, y_{c_i}, t) - Y_i(t)\Big] - c_s\Big[\dot{Z}(x_{c_i}, y_{c_i}, t) - \dot{Y}_i(t)\Big] \quad i = 1, 2 \tag{5}$$

  with $Y_i(t)$ and $Z(x_{c_i}, y_{c_i}, t)$ the displacements of the lower mass of hopper $i$ and the slab at the contact point $i$ respectively. The displacement of the slab in physical coordinates at location $(x, y)$ can be computed as:

$$Z(x, y, t) = \sum_{n=1}^{M} q_n(t)\phi_n(x, y) \tag{6}$$

## 3.2 Dynamics of the coupled model

The dynamics of the coupled system can then be written into a compact matrix form consisting of ($N = N_s + 4$) modal equations:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{M} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1(t) \\ \ddot{Y}_1(t) \\ \ddot{X}_2(t) \\ \ddot{Y}_2(t) \\ \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{S}(t) \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_v & -c_v & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ -c_v & c_v + c_s & 0 & 0 & \mathbf{D}_1 \\ 0 & 0 & c_v & -c_v & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & -c_v & c_v + c_s & \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{D}_2 & \mathbf{C} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{Y}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \\ \dot{Y}_2(t) \\ \dot{\mathbf{q}}_\mathbf{S}(t) \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_v & -k_v & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ -k_v & k_v + k_s & 0 & 0 & \mathbf{E}_1 \\ 0 & 0 & k_v & -k_v & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & -k_v & k_v + k_s & \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{E}_2 & \mathbf{K} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_1(t) \\ Y_1(t) \\ X_2(t) \\ Y_2(t) \\ \mathbf{q}_\mathbf{S}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ f_2(t) \\ 0 \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

where $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$, $\mathbf{E}_1$ and $\mathbf{E}_2$ are coupling vectors for damping and stiffness effects given by:

$$\mathbf{D}_1 = -[k_s\phi_1(x_{c_1}, y_{c_1}), \ldots, k_s\phi_M(x_{c_1}, y_{c_1})], \quad \mathbf{D}_2 = -[k_s\phi_1(x_{c_2}, y_{c_2}), \ldots, k_s\phi_M(x_{c_2}, y_{c_2})] \tag{8a}$$

$$\mathbf{E}_1 = -[k_s\phi_1(x_{c_1}, y_{c_1}), \ldots, k_s\phi_M(x_{c_1}, y_{c_1})]^T, \quad \mathbf{E}_2 = -[k_s\phi_1(x_{c_2}, y_{c_2}), \ldots, k_s\phi_M(x_{c_2}, y_{c_2})]^T \tag{8b}$$

The matrice $\mathbf{M}$ is diagonal while $\mathbf{K}$ and $\mathbf{C}$ are full matrices due to the hoppers/slab coupling which highlights that all slab modes are coupled through the contact forces. They respectively take the form:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_s + c_s\mathbf{\Phi}(x_{c_1}, y_{c_1}) + c_s\mathbf{\Phi}(x_{c_2}, y_{c_2}) \tag{9a}$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_s + k_s\mathbf{\Phi}(x_{c_1}, y_{c_1}) + k_s\mathbf{\Phi}(x_{c_2}, y_{c_2}) \tag{9b}$$

where $\mathbf{C}_s$ and $\mathbf{K}_s$ are the diagonal matrices for the modal parameters of the slab and $\mathbf{\Phi}(x_{c_i}, y_{c_i})$ are the coupling matrices given by:

$$\mathbf{\Phi} = \begin{pmatrix} \phi_1(x_{c_i}, y_{c_i})\phi_1(x_{c_i}, y_{c_i}) & \phi_2(x_{c_i}, y_{c_i})\phi_1(x_{c_i}, y_{c_i}) & \ldots & \phi_M(x_c, y_c)\phi_1(x_c, y_c) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_1(x_{c_i}, y_{c_i})\phi_M(x_{c_i}, y_{c_i}) & \phi_2(x_{c_i}, y_{c_i})\phi_M(x_{c_i}, y_{c_i}) & \ldots & \phi_M(x_{c_i}, y_{c_i})\phi_M(x_{c_i}, y_{c_i}) \end{pmatrix} \tag{10}$$

## 3.3 Modal behaviour of the physical model

It is well known that computations in the frequency domain can be insightful to study the effects of physical parameter changes on the dynamical behaviour of a mechanical system. Indeed, a simple comparison of the frequency response before and after the insertion of the vibrator isolator can provide a feel about the efficiency of the elastic decoupling. Also, parametric computations can be performed to study the changes in the modal frequencies and damping values as a function of the isolator's mechanical characteristics. In a modal framework, this requires the knowledge of the modal parameters of the coupled system which are essential ingredients to build the system transfer function, in terms of acceleration response, according to:

$$H(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_r, \omega) = \sum_{n=1}^{N} \frac{-\omega^2\psi_n(\mathbf{r}_0)\psi_n(\mathbf{r}_r)}{m_n(\omega_n^2 - \omega^2 + j2\omega\omega_n\zeta_n)} \tag{11}$$

where $\mathbf{r}_0$ and $\mathbf{r}_r$ are the excitation and response locations respectively, $\omega_n$ and $\zeta_n$ the natural frequencies and damping values of the system coupled modes and $m_n$ and $\psi_n$ the corresponding modal mass and mode shape. As classical in vibration analysis, one can assume harmonic solutions of the form $\mathbf{w}(t) = \mathbf{a}e^{j\omega_n t}$ for free motion and then rewrite Eq. (7) in its first-order form to obtain a quadratic eigenvalue problem. The eigenproblem is then easily solved by standard procedures, resulting in estimates of $\omega_n$ and $\zeta_n$ as well as the eigenvector $\mathbf{a}$. The mode shapes of the coupled system $\psi_n(\mathbf{r})$ in physical space can then be computed by modal recombination of the original sub-system mode shapes as:

$$\psi_n(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^{M} a_j\phi_n(\mathbf{r}) \quad \bigcup \quad \sum_{j=1}^{4} a_j\phi_n^m(\mathbf{r}) \tag{12}$$

where $\phi_n(\mathbf{r})$ and $\phi_n^m(x_c) = 1$ are the modeshapes of the slab and the four rigid masses respectively. Once the eigenvectors are known, the modal mass of the coupled system can be estimated by:

$$m_n = \text{diag}(\mathbf{a}^T\mathcal{M}\mathbf{a}) \tag{13}$$

where $\mathcal{M}$ referred as to the mass matrix of the coupled system of Eq.(7). Fig. 6 displays three transfer functions computed in this way from the modal parameters obtained by modal analysis. As seen, the model reproduces the general trends of the modal measurements plotted in Fig.2 but no perfect matching between experimental and computed transfer functions have been achieved. There is several reasons to explain these discrepancies. There are actually large uncertainties regarding the values of the masses $m_1$ and $m_2$ of the upper and lower parts of the hopper as well as on the surface density of the concrete installed at the winery. Also, no information has been provided regarding the dynamical characteristics of the four

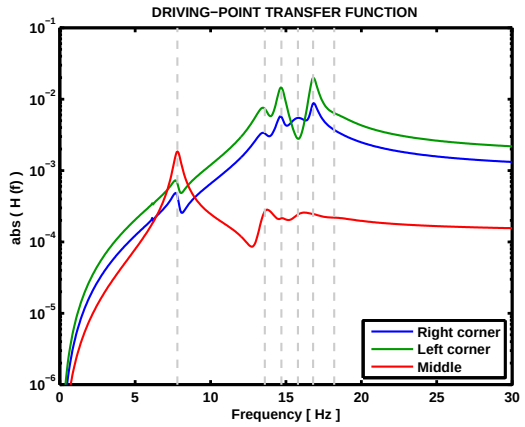



Figure 6: Slab driving-point transfer functions computed by the physical model.

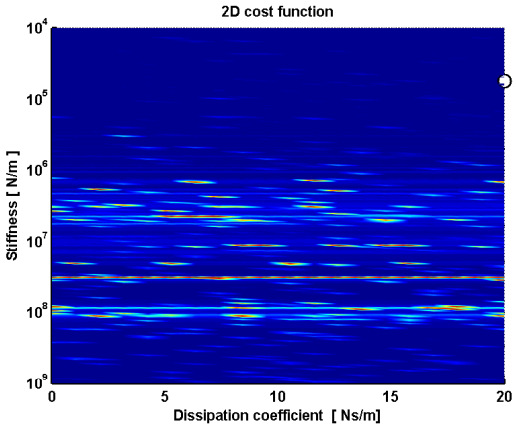



Figure 7: Optimal characteristics of the isolator stemming from the minimization of Eq.(14).

internal flexible mounts (model *Evidgom* 810784) separating the two parts of the hoppers. Some errors may also have occured during the modal identification procedure since it still involves the user interaction for the determiniation of the order of the model. However, the model - even if not perfect - appears sufficient to investigate the attenuation provided by the vibration isolator as a function of its stiffness and damping properties.

# 4 Optimization of the isolator characteristics

The characteristics of the isolator have been sought by devising optimization strategies aiming at maximizing the effectiveness of the isolation between the hopper mass excited by the motor and the slab response at several critical locations. From the computations of the transfer functions with and without the isolator, given by Eq.(11), we can define the following function error $\varepsilon(k_s, c_s)$ to be minimized by the stiffness and damping values of the isolator, $k_s$ and $c_s$ respectively:

$$\varepsilon(k_s, c_s) = \sum_{j=1}^{3} \left( \frac{\max\limits_{\omega_1 \le \omega \le \omega_2} \left( |\hat{H}(x_{c_1}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)| \right)}{\max\limits_{\omega_1 \le \omega \le \omega_2} \left( |H(x_{c_1}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)| \right)} + \frac{\max\limits_{\omega_1 \le \omega \le \omega_2} \left( |\hat{H}(x_{c_2}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)| \right)}{\max\limits_{\omega_1 \le \omega \le \omega_2} \left( |H(x_{c_2}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)| \right)} \right) \tag{14}$$

where $\hat{H}(x_{c_i}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)$ and $H(x_{c_i}, x_{s_j}, \omega, k_s, c_s)$ are the transfer functions for acceleration response between hopper $i$ and the slab location $x_j$, with and without the vibration isolator respectively, and $\omega_1$ and $\omega_2$ the lower and upper limits of the frequency range considered in the optimization. As illustrated in Fig.7, minimization of this function is achieved using parameters $k_s$ = 5.5$\times$10$^4$ N/m and $c_s$ = 20 Ns/m thus ensuring the optimal decoupling according to Eq.(14). As one would expect, the optimal damping value corresponds to the limit of the search domain of the optimization while the optimal stiffness is a low value, corresponding of nearly 1 Hz natural frequency. This is indeed consistent with the rule stating that, for rigid foundation, the larger the ratio of operating and resonance frequencies is, the larger the success of the solution will be. Fig. 8 displays a comparison of the transfer functions before and after the insertion of the “optimal” isolator. Looking at the amplitude of the vibratory responses, it can first be seen the effective large attenuation provided by the isolator, 19 dB in average over the frequency range of interest. Indeed, the isolator acts as a mechanical lowpass filter and controls not only the first problematic mode but also all other higher-order modes of the coupled system. Other relevant aspect of the proposed solution is the strong coupling of the isolator with the system for the lowest mode of the original configuration, highlighted by the frequency split around the first normal mode, while the modal frequencies of higher modes remain unaltered as one would expected for elastic decoupling. The frequency split can be easily explained by the insertion of the isolator since it intrinsically adds a new

degree of freedom and thus a new resonance to the dynamics of the coupled system. For the corresponding operating frequency, this can be particularly problematic during operation but fortunately, the model does not predict large difference in vibration amplitude for this running speed between the controlled and uncontrolled configuration.

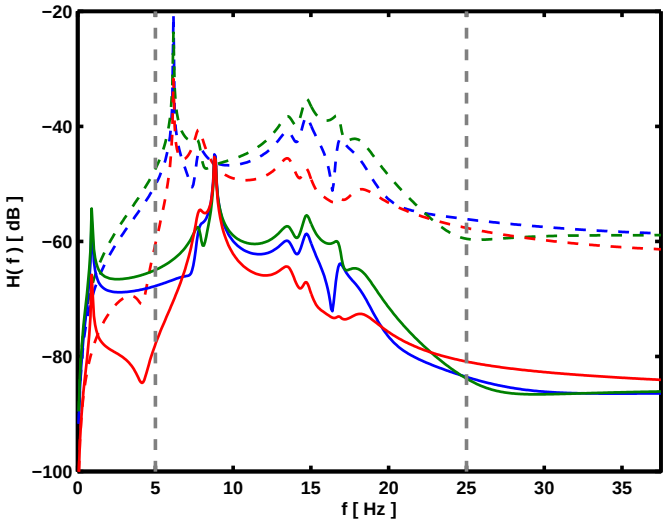



Figure 8: Computed transfer functions before (dash) and after (solid) the insertion of the isolator with characteristics defined by the minimization of Eq.(14). Excitation is on the upper mass of one hopper while response is given for three critical locations on the slab. Legend is the same as in Fig. 6. The vertical gray lines bound the frequency range considered in the optimization procedure.

# 5 Practical implementation and conclusions

Bridging the gap between the theoretical characteristics and the available commercial solutions is usually a delicate task even if manufacturer catalogues provide a large variety and type of solutions. If steel-spring axial isolator appears as a rugged and reliable solution for the practical realisation, the major difficulty here comes from the low stiffness value of the isolator to design which inevitably leads to very large static deflection for conventional springs. Other limitation is concerned with their height-to-width ratio which affects their axial stability, especially for such low frequencies. One commercial solution which can approach the requirements is air spring systems which have successfully solved vibration problems in many applications, including on vehicular suspensions. Air springs provide low frequency and zero-static deflection and can ensure constant operating frequency, even under varying load, by simple adjustment of the height of the mount through air supply control. We decided to implement a solution based on four air spring systems (see Fig. 9) capable of 2 Hz natural frequency (CDM AIR Cushion 6”$\times$ 2), uniformly positioned within the equipment for dividing the load among the isolator and attached through some intermediate frame (see Fig. 10). Double convolution bellows have been preferred to gain axial stability and external mechanical stops, mounted in compression against the equipment, have been designed to increase the low damping of the mounts through friction and also reduce lateral displacements. Finally, soft elastic layers have been inserted between the isolator end retainer and the slab to decouple them on the whole surface of contact.
The pratical realisation has been implemented for one hopper of the winery and vibratory measurements have been recently performed at Gran Cruz. Table 1 presents preliminary results regarding the measured vibration amplitudes, before and after the installation of the isolator. As seen, the installation of the solution has been very successful, resulting in a net decrease of the vibration amplitude of about 26 dB for the measured motor running speeds.



Figure 9: Example of CDM air cushion mounted on the equipment.

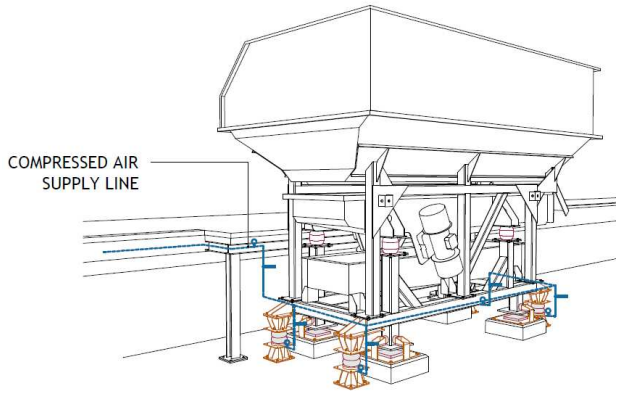



Figure 10: Anti-vibration solutions installed at Gran Cruz Winery.

| | Uncontrolled | Controlled |
|---|---|---|
| velocity 4 | 114 dB | 86 dB |
| velocity 10 | 101 dB | 82 dB |

(a) Left slab corner

| | Uncontrolled | Controlled |
|---|---|---|
| velocity 4 | 115 dB | 78 dB |
| velocity 10 | 114 dB | 82 dB |

(b) Right slab corner

Table 1: Mean acceleration (dB ref. 1e-6 m/s$^2$) measured at two locations on the slab with one hopper operating for two critical running speeds. Results before and after the implementation of the solution.

## Acknowledgments

The authors thank Dr. José Antunes, head of the Applied Dynamics Laboratory (IST/C2TN), for his valuable contribution to the experimental work and helpful discussions regarding modeling aspects. We are also greatly thankful to André Prata, André McDade and Filipe Martins from InAcoustics, and the collaborators of Gran Cruz for their cooperation during the measurements and practical realisation. Vincent Debut also aknowledges support from the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) under grant research FCSH/INET-md/UID/EAT/00472/2013.

## References

[1] C. M. Harris, C. E. Crede. “Shock and Vibration Handbook”, McGraw-Hill, New-York, USA, 1976.

[2] J. He. “Structural modification”. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol.A-359, pp.187-204, 2001.

[3] C.R. Fuller, S.J. Elliot and P.A Nelson, “Active control of vibration”, Academic Press Inc., San Diego, 1996.

[4] M. Moser, “Engineering Acoustics: an introduction to noise control”, Springer, Berlin, 2004.

[5] J. Juang, “Applied System Identification”, PTR Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1994.

[6] V. Debut, M. Cavalho and J. Antunes, “An objective approach for assessing the tuning properties of historical carillons”. *Applied Acoustics*, pp. 78-90, 2016.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# AVALIAÇÃO DE INCOMODIDADE DEVIDO A VIBRAÇÕES COMPARAÇÃO DE CRITÉRIOS

PACS: 43.40

Carlos Aroeira[(1)]
[(1)] dBWave I
[(1)] Av. Prof. Dr. Cavaco Silva, 33
2740-120 Porto Salvo; Portugal
Tel: (+351) 214228197
Fax: (+351) 214228120
E.mail: cmaroeira.dbwave@isq.pt

## ABSTRACT

The assessment of discomfort, in its multiple facets, it is a very relevant issue in the current European society, due to the impact of the interpretation made by the Courts of Article 8 of the European Convention on Human Rights.

In what concern vibration, this situation create a new challenge to the testing laboratories, since they will have to advise on the existence of any discomfort, without being defined legal limits.

In this paper, various evaluation criteria of discomfort due to vibration, will be revised, and presented and discussed various experimental results.

## RESUMO

A avaliação da incomodidade, nas suas múltiplas vertentes, tornou-se numa questão muito relevante na sociedade europeia atual, devido ao impacto da interpretação efetuada pelos Tribunais do Artigo 8º da Convenção Europeia dos Direitos do Homem.

Em termos de vibrações, tal situação coloca aos laboratórios de ensaio um novo desafio, já que terão de se pronunciar sobre a existência de eventual incomodidade, sem que estejam definidos limites legais.

Neste artigo serão revistos, diversos critérios de avaliação de incomodidade devido a vibrações, sendo apresentados e discutidos os correspondentes resultados experimentais.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao dia de hoje a sociedade está muito atenta às questões ambientais. As pessoas estão cada vez mais cientes dos seus direitos e multiplicam-se as organizações que dão voz às suas exigências. Na comunicação social e na internet repercutem-se regularmente os ecos desta sensibilidade e, paralelamente, os tribunais dão cada vez mais atenção às suas reclamações. O poder judicial afirma repetidamente a sua autonomia face ao poder político e inúmeras vezes dá razão aos cidadãos, contra decisões administrativas e políticas dos organismos de estado. Neste entorno, todas as questões relacionadas como a incomodidade são críticas.

## 2 ENQUADRAMENTO LEGAL DO DIREITO AO CONFORTO

A nível Europeu o documento mais importante é a Convenção Europeia dos Direitos do Homem que estabelece:

> **Artigo 8.º**
>
> **(Direito ao respeito pela vida privada e familiar)**
>
> 1. Qualquer pessoa tem direito ao respeito da sua vida privada e familiar, do seu domicílio e da sua correspondência.

Este direito também está estabelecido na Constituição da Republica Portuguesa:

> Artigo 66.º
> Ambiente e qualidade de vida
> 1. Todos têm direito a um ambiente de vida humano, sadio e ecologicamente equilibrado e o dever de o defender.

Tem sido entendido pelos tribunais que, incluído nestes direitos, está o direito das pessoas não serem incomodadas em sua casa, por isso poder afetar a sua saúde. Assim, apesar de não existirem, para as vibrações, limites estipulados em nenhuma lei, o direito ao conforto está bem salvaguardado na lei.

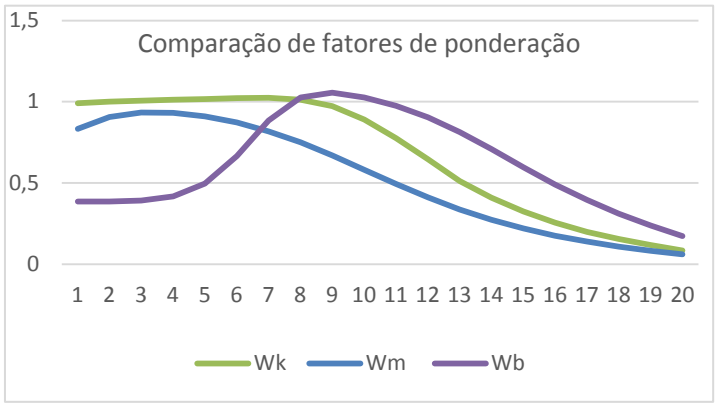
## 3 RESPOSTA HUMANA A VIBRAÇÕES EM EDIFICIOS

Nas habitações, é provável ocorrerem comentários adversos sobre vibrações no edifício quando os níveis de vibração, aos quais os ocupantes estão expostos, forem só ligeiramente superiores os limiares de perceção. Nos locais de trabalho, os comentários adversos frequentemente surgem a níveis bastante superiores, embora as pessoas com uma ocupação sedentária reajam mais como ocupantes de residências.

O critério a utilizar para avaliar a resposta humana requer considerações sobre o tipo de ocupação esperada no edifício (habitações, escritórios ou oficinas) e a atividade dos ocupantes.

Quer seja em casa ou no trabalho, a tolerância das pessoas varia num grande intervalo de valores, dependendo os valores específicos de fatores socias e culturais, atitudes psicológicas e o esperado grau de intrusão.

**Resposta em frequência**




A forma como as pessoas sentem as vibrações nos edifícios depende de vários fatores, incluído a frequência da vibração e direção. Quando se procede à avaliação da resposta humana são assim necessárias diferentes ponderações em frequência conforme o eixo do movimento. Na ISO 2631-2;2003 recomenda-se a utilização da ponderação $W_d$ e $W_k$ para as direções horizontais e vertical respetivamente, caso se conheça a postura dos ocupantes, ou a ponderação $W_m$, caso não seja conhecida. Na BS 6472-1;2008 recomenda-se a utilização da ponderação $W_d$ e $W_b$ para as direções horizontais e vertical respetivamente. A ponderação $W_m$ é utilizada quando não se conhece a direção da excitação, como é muito comum em situações de incomodidade.

**Limiares de perceção**

Os limiares de perceção para vibração variam grandemente de individuo para individuo. De acordo com a NP ISO 2631-1:2007 “Cinquenta por cento das pessoas (atentas e em boa forma física) conseguem detetar uma vibração ponderada com ponderação $W_k$ com uma amplitude de pico igual a 0.015 m/s$^2$. Existe uma variação muito grande, de pessoa para pessoa, na capacidade de perceção de vibrações. Enquanto o limiar de perceção médio é aproximadamente igual a uma amplitude pico de 0.015 m/s$^2$, a gama de respostas pode variar de cerca de 0.01 m/s$^2$ até 0.02 m/s$^2$.”

**Efeitos simultâneos**

A forma como as pessoas num edifício reagem a um determinado nível de vibração, também pode depender de efeitos relacionados, que ocorrem em simultâneo. Os efeitos mais comuns são:

- Ruído nascido na estrutura devido a propagação por via sólida;
- Ruído aéreo;
- Ruídos de chocalhar induzidos;
- Efeitos visuais;
- Influências de terceiros.

**Atividade das pessoas**

Um individuo, num edifício, sentir ou não uma vibração de uma determinada amplitude, depende do que a pessoa está fazer, de onde está no edifício, como a pessoa está acoplada ao edifício e da direção dominante da vibração. Alguém que se desloque é menos sensível às vibrações que uma pessoa que não se mova, e que esteja num dado local. Se a pessoa estiver de pé o acoplamento é mais direto. Se estiver sentada o acoplamento é menos direto, particularmente se o assento for estufado. A construção do assento pode resultar nalgum isolamento de vibrações, ou pelo contrário, uma ressonância pode amplificar as vibrações. O mesmo se pode referir relativamente a camas.

**A atitude das pessoas**

A reação humana em situações de conforto é hoje em dia, uma disciplina técnica bem estudada, entre outras coisas porque os fabricantes de veículos efetuarem grandes investimentos para assegurar as melhores condições para os seus passageiros. Ou seja, está estabelecido cientificamente que o desconforto é subjetivo, e a reção humana em situações de conforto depende de diversos fatores independentes do agente físico que provoca a reação.

## 4 NORMALIZAÇÃO E RECOMENDAÇÕES

Face à ausência de limites legais, para avaliação da incomodidade de vibrações em Portugal são usadas diversas normas e recomendações a seguir referidas:

- O designado “critério do LNEC”
- A norma ISO 2631 Parte 1 e 2
- A norma BS 6472 (2008)

**O critério do LNEC**

Este critério está definido num artigo[1] de 2001, e reflete anos de experiência do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O parâmetro de avaliação de incomodidade de vibração continuada utilizado é a velocidade eficaz, e é apresentado o seguinte quadro:

| $v_{ef}$ (mm/s) | sensação |
|---|---|
| $v_{ef} < 0,11$ | nula |
| $0,11 < v_{ef} < 0,28$ | percetível , suportável para pequena duração |
| $0,28 < v_{ef} < 1,10$ | nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho |
| $1,10 < v_{ef}$ | muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho |

**A ISO 2631 Parte 1 e 2**

A ISO 2631 não apresenta nenhum critério de avaliação de incomodidade. Apresenta no entanto indicações relevantes sobre esta questão que, de forma indireta, podem ser utilizadas

como critério para determinar se os níveis de vibração excedem o limiar de perceção. e se são suscetíveis de gerar incomodidade.

"A experiência mostra que, em muitos países, é frequente os ocupantes de edifícios residenciais queixarem-se das amplitudes de vibração desde que estas ultrapassem um pouco o limiar de perceção." (Anexo 3 - C.3 Reações em termos de conforto a ambientes com vibrações NP ISO 2631-1_2007)

"Cinquenta por cento das pessoas (atentas e em boa forma física) conseguem detetar uma vibração ponderada com ponderação $w_k$, com uma amplitude de pico igual a 0.015 m/s$^2$. Há uma variação muito grande de pessoa para pessoa na capacidade de perceção de vibrações. Sendo o limiar de perceção médio aproximadamente igual a 0.015 m/s2, a gama de respostas pode variar de cerca de 0.01 m/s$^2$ até 0.02 m/s$^2$ (amplitude de pico)." (Anexo 3 - C.3 Perceção, NP ISO 2631-1_2007)

Tem-se assim que se os níveis forem inferiores a 0.010 m/s$^2$ de amplitude pico, medida com ponderação $w_k$, não pode existir incomodidade devido a vibrações, por estes níveis estarem abaixo do nível de perceção. Acima deste valor, pode ser que ocorra incomodidade.

**A norma BS 6472 (2008) - Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Vibration sources other than blasting**

Esta norma surge da necessidade de estabelecer um critério mais claro de avaliação de incomodidade de vibrações que o estabelecido na ISO 2631.Está dividida em Parte 1 e 2; a Parte 1 refere-se a vibrações que não as devidas a explosões, e a Parte 2 refere-se às vibrações devidas a explosões. A grandeza medida é a aceleração, com as ponderações $W_d$ e $W_b$ para as direções horizontais e vertical respetivamente.

O parâmetro utilizado para avaliação é o VDV (Vibration Dose Value).que é definido da

$$VDV_{b/d,day/night} = \left(\int_0^T a^4(t)dt\right)^{0.25}$$

seguinte forma:

Onde:
VDV $_{b/d,day,night}$ é ao valor de dose de vibração (em m.s$^{-1.75}$)
*a(t)* é a aceleração ponderada em frequência (em m.s$^{-1.75}$), utilizando as ponderações *Wb* ou *Wd* conforme apropriado.
T é o período total do dia ou noite (em s9 durante o qual a vibração pode ocorrer.

Nesta norma é apresentada a seguinte tabela com os critérios de avaliação:

| Gamas de Valor de Dose de Vibração (VDV) que podem resultar em várias probabilidades de comentários adversos em edifícios de habitação (para escritórios e oficinas devem-se utilizar fatores multiplicadores de 2 e 4, respetivamente, aos valores referidos, para um dia de 16 horas) |
|---|

| Local e tempo | Reduzida probabilidade de comentários adversos | É possível ocorrerem comentários adversos | É provável ocorrerem comentários adversos |
|---|---|---|---|
| Edifícios de habitação, 16 horas, dia | 0,2 a 0,4 $m.s^{-1.75}$ | 0,4 a 0,8 $m.s^{-1.75}$ | 0,8 a 1,6 $m.s^{-1.75}$ |
| Edifícios de habitação, 8 horas, noite | 0,1 a 0,2 $m.s^{-1.75}$ | 0,2 a 0,8 $m.s^{-1.75}$ | 0,4 a 0,8 $m.s^{-1.75}$ |

## 5 ENSAIOS

Em todos os ensaios foi utilizado um vibrometro SV979A e um acelerómetro triaxial de alta sensibilidade SV84.

### Caso 1

Este ensaio foi realizado num edifício de habitação devido a ocorrer uma queixa de incomodidade de vibrações. A fonte eram instalações técnicas, numa habitação vizinha onde tinham já sido feitas intervenções para reduzir os níveis gerados e transmitidos. Mesmo depois da intervenção persistiam as queixas. Foi efetuado um ensaio que consistiu na medição da amplitude das vibrações, no recetor, no ponto mais próximo da origem das vibrações, durante alguns dias.

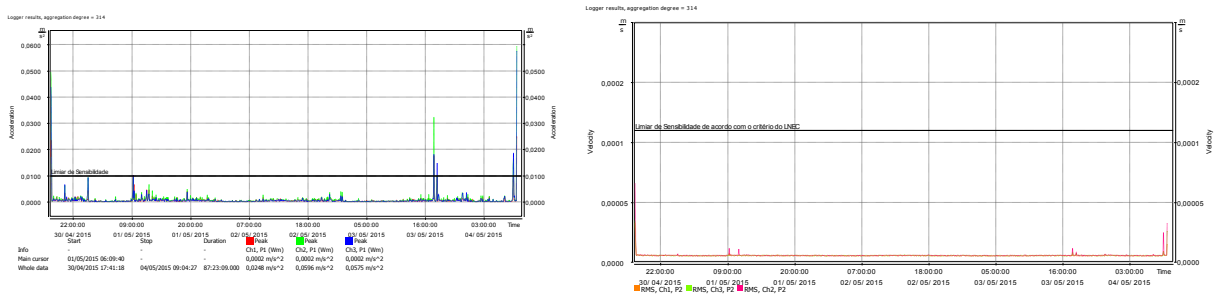



Figura 2 – Aceleração Pico (Wm), e Velocidade eficaz (1 Hz-20 KHz), medidas durante diversos dias, uma vez por segundo

Na Figura 2 no gráfico em aceleração podem-se observar excedências pontuais do limiar de sensibilidade do critério da ISO 2631 relacionadas com a presença de pessoas no recinto recetor. Não se consegue observar níveis vibratórios com patamares típico do funcionamento de instalações técnicas. No gráfico em Velocidade pode-se observar que o limiar definido no critério do LNEC, nunca é excedido, apesar de pontualmente, efetivamente se conseguirem sentir as vibrações.

Concluiu-se que as queixas de incomodidade estavam relacionadas com o histórico do funcionamento das instalações técnicas na habitação vizinha e com a atitude dos ocupantes do espaço face à situação.

**Caso 2**

Este caso refere-se a uma queixa de incomodidade num edifício de escritórios relacionado com o funcionamento de uma instalação industrial vizinha. Os ocupantes do escritório queixavam-se de sentir os vidros das janelas "a bater". A fonte eram instalações industriais vizinhas onde existiam máquinas que funcionavam de modo pontual e eram fontes de vibrações. Foi efetuado um ensaio que consistiu na medição da amplitude das vibrações, no recetor, numa sala de reuniões, num ponto que se considerou representativo, enquanto as instalações industriais vizinhas se encontravam em funcionamento.

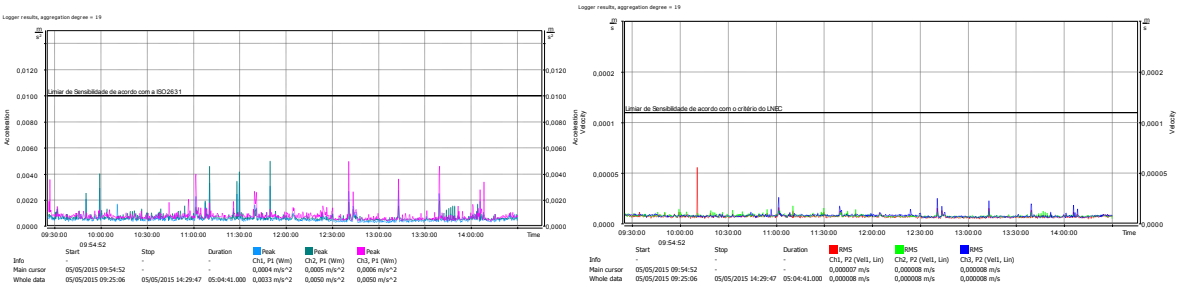



Figura 3 – Aceleração Pico (Wm), e Velocidade eficaz (1 Hz-20 KHz) medidas durante diversas horas, uma vez por segundo

Em nenhum momento se podem observar ultrapassagens dos limiares de sensibilidade.

Concluiu-se que as queixas de incomodidade estavam relacionadas com as ocorrências paralelas de "vidros a bater" e não com os níveis de vibrações no solo.

**Caso 3**

Este caso refere-se à caracterização de uma situação de referência numa habitação, em que não ocorriam queixas de incomodidade. Foi efetuado um ensaio que consistiu na medição da amplitude das vibrações, durante um fim-de-semana, numa sala, num ponto que se considerou representativo

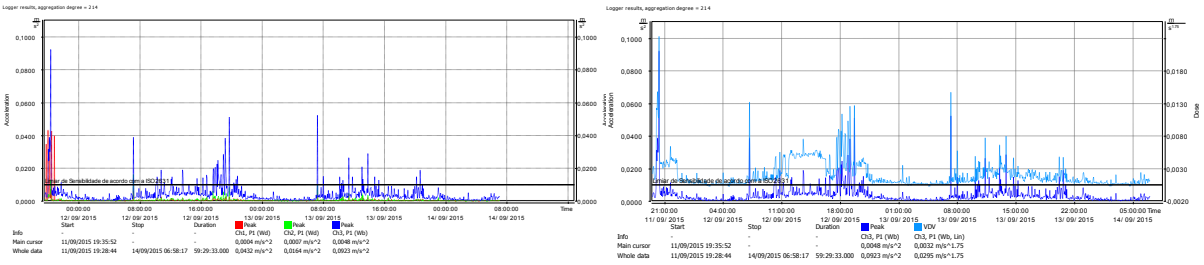


Figura 4 – Aceleração Pico, (Wd,Wm), e VDV medidos durante diversas dias, uma vez por segundo

Observam-se ultrapassagens dos valores limite indicados, sobretudo relacionados com a presença humana. Nota-se também que o valor do VDV, no gráfico da direita, como é natural excede o valor da amplitude pico, devido ao facto de ponderar mais o nível de vibrações.

## 6 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### Sobre a subjetividade da resposta humana

A partir dos ensaios efetuados torna-se mais uma vez óbvio algo que já se sabe há muito, que consiste em poderem existir queixas de incomodidade de vibrações e os níveis nem sequer atingirem o limiar de perceção, ou pelo contrário, eles serem excedidos e não ocorrer qualquer queixa. Assim sendo a avaliação da incomodidade nunca poderá ser algo cem por cento objetivo, e tal já é refletido na normalização mais recente, nomeadamente na BS 6472 (2008), em que não são referidos valores absolutos, mas sim intervalos de avaliação, e desta forma é dada uma margem ao avaliador para efetuar uma recomendação de limite para cada caso específico.

A partir dos ensaios referidos torna-se mais uma vez evidente que a identificação da fonte das vibrações e efeitos paralelos é muito relevante para a compreensão e avaliação das queixas de incomodidade de vibrações, devido á forte influência que têm na reação humana relativamente a vibrações em edifícios.

### Sobre os níveis de vibrações e a forma dos medir

Também é sabido que a reação humana se refere ao que se sente, ou se pensa sentir, e não relativamente a valores médios. Assim a utilização exclusiva de valores médios é sempre uma forma inadequada de avaliar a incomodidade sendo mais aconselhável a utilização de valores pico. A obtenção do registo da história temporal dos valores pico, nas três direções ortogonais, por períodos prolongados, é uma ajuda essencial para perceber os fenómenos em causa e estabelecer a pertinência da queixa. Ainda assim, a ponderação do tempo de exposição é sempre relevante porque a resposta humana é influenciada por este fator.

Os sensores utilizados devem ser de alta sensibilidade, para permitir medir a vibração “residual” de forma a permitir evidenciar claramente os eventos vibratórios relevantes.

### Sobre a resposta em frequência

A influência da frequência da vibração está hoje em dia, bem comtemplada na normalização, através da utilização dos filtros de ponderação em frequência das vibrações medidas, embora se espere ainda assistir a uma evolução nesta área.

## 7 CONCLUSÃO

Desde há muito que se conhece a componente subjetiva da resposta humana, em situações de conforto, originando que o estabelecimento de critérios objetivos de avaliação de incomodidade, com resposta satisfatória em todas as circunstâncias possíveis, seja sempre algo muito complexo, ou mesmo impossível.

Aqui foi revisto um critério e alguma normalização existente, tendo a sua aplicação sido analisada face a três casos concretos.

Foram também revistos alguns aspetos relacionados com a instrumentação de medida e respetivos procedimentos de utilização.

**REFERÊNCIAS**

1 Vibrações ambientes. Critérios de danos e de incomodidade. Actualidade e perspectivas futuras. Schiappa de Azevedo, Fernando; Patrício, Jorge, TECNIACUSTICA 2001

2 NP ISO 2631-1_2007 Vibrações mecânicas e choque - Avaliação da exposição do corpo humano a vibrações, Parte 1 - Requisitos gerais

3 ISO 2631-2_2003 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to wholebody vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)

4 BS 6472 (2008) - Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Vibration sources other than blasting

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SELECÇÃO DE PROTECTORES AUDITIVOS SONÓMETROS vs. DOSÍMETROS DE RUÍDO

PACS: 43.58.Fm

João António de Matos[(1)]; Pedro Alexandre Rosa[(1)]; Carlos César Rodrigues[(2)]
[(1)] SPECMAN - Engenharia, Diagnóstico e Manutenção, Lda.; [(2)] Instituto Superior Engenharia Lisboa
[(1)] Av. Marquês de Tomar, 33 - 3.º Dto.; 1050-153 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 217935017; Fax: (+351) 217951085; specman@specman.pt
[(2)] Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; crodrigues@adf.isel.pt

## ABSTRACT

Traditionally, occupational noise measurements are performed using (i) integrating sound level meters, when evaluating workers in a “fixed work station”, that is, limited to a determined working area, or (ii) noise dosimeters, when evaluating “mobile” workers, that is, without a pre-determined working area. The selection of hearing protectors, when necessary, demands frequency analysis, in 1/1 octave bands, of the noise to which the worker is exposed to.

Nowadays, there are noise dosimeters with frequency analysis in 1/1 octave bands, that allow the calculation of the worker’s personal noise exposure averaged values, in frequency.

In this paper, the authors will show that making use of such instruments may result in the determination of erroneous results, since the use of averaged values, may determine the selection of inadequate hearing protectors.

## RESUMO

Tradicionalmente, as medições de ruído ocupacional são realizadas recorrendo a (i) sonómetros integradores, no caso de trabalhadores “fixos”, isto é, actuantes numa área limitada, ou a (ii) dosímetros de ruído, no caso de trabalhadores “móveis”, ou seja, sem área de trabalho definida. A selecção de protectores auditivos, quando necessária, impõe a análise em frequência, por bandas de 1/1 oitava, do ruído a que se encontra exposto o trabalhador.

Actualmente, existem dosímetros de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava, que permitem obter valores médios, por frequência, da exposição diária do trabalhador ao ruído.

Neste artigo, os autores evidenciarão que recorrer a este tipo de instrumentação pode determinar a obtenção de resultados erróneos, uma vez que ao serem utilizados valores médios, tal pode resultar na selecção de protectores auditivos inadequados.

## 1. INTRODUÇÃO

A introdução no mercado da avaliação acústica nos locais de trabalho de dosímetros de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava gerou nos seus tradicionais utilizadores - Técnicos Superiores de Higiene e Segurança do Trabalho - uma dúvida:

*"Para seleccionar protectores auditivos, poderei recorrer a dosímetros de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava, em detrimento de sonómetros integradores com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava?"*

Os autores mostram no presente artigo, exemplificando com o estudo de um caso, que o uso de um dosímetro de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava, em detrimento de um sonómetro integrador com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava, para a selecção de protectores auditivos, é errado, uma vez que pode originar, em determinadas situações, uma selecção inadequada de protector auditivo.

## 2. DOSÍMETRO DE RUÍDO VS. SONÓMETRO INTEGRADOR

A norma NP EN ISO 9612:2011 define um dosímetro de ruído como um equipamento de medição de som que cumpre a norma IEC 61252.

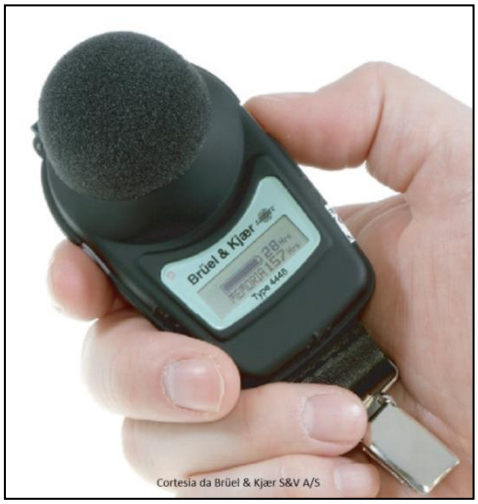



Figura 1 – Dosímetro de ruído tipo 4448 da Brüel & Kjær

O dosímetro de ruído é, assim, essencialmente semelhante a um sonómetro integrador com a importante vantagem de poder ser instalado junto ao corpo do trabalhador que se pretende avaliar e, deste modo, acompanhar o trabalhador ao longo do seu dia normal de trabalho.

Normalmente, o conjunto microfone/pré-amplificador de microfone do dosímetro de ruído é montado na parte superior do ombro do trabalhador, junto à orelha que se encontra mais exposta ao ruído, sendo que o corpo do dosímetro de ruído é instalado na cintura do trabalhador. Em alternativa, existem dosímetros de ruído compactos que permitem a sua montagem na parte superior do ombro do trabalhador.

A norma NP EN ISO 9612:2011 define, com exactidão, a correcta montagem de um dosímetro de ruído num trabalhador.

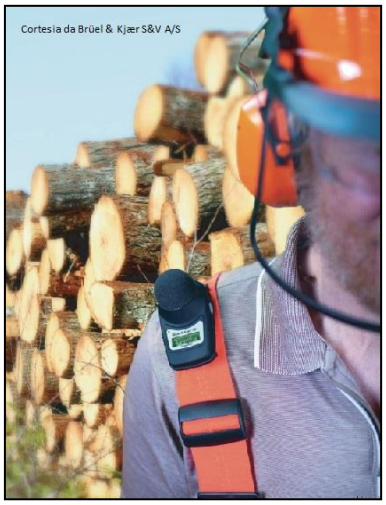



Figura 2 – Exemplo de montagem de um dosímetro de ruído num trabalhador

Esta característica particular do dosímetro de ruído permite, de modo fácil e eficaz, a medição da exposição pessoal diária ao ruído ocupacional de um trabalhador "móvel", ou seja, de um trabalhador sem área de trabalho definida. Tipicamente, são trabalhadores para os quais é seleccionada a estratégia de medição "medição baseada no dia completo" conforme se encontra estabelecido na norma NP EN ISO 9612:2011. O dosímetro de ruído é instalado no trabalhador "móvel", acompanhando-o durante toda a sua actividade laboral, permitindo, deste modo, realizar a medição ao longo da totalidade do dia de trabalho.

É, de facto, esta característica de portabilidade que distingue o dosímetro de ruído do sonómetro integrador e que determina que aquele seja encarado como o equipamento de eleição para a medição da exposição pessoal diária ao ruído ocupacional de um trabalhador "móvel".

Pelo contrário, um sonómetro integrador deve ser utilizado numa posição fixa, não podendo, deste modo, acompanhar o trabalhador ao longo do seu dia normal de trabalho quando este é constituído pela execução de tarefas em diferentes localizações espaciais.




Figura 3 – Sonómetro integrador tipo 2250-L da Brüel & Kjær

Nestes casos, a avaliação da exposição pessoal do trabalhador ao ruído ocupacional terá de ser obtida através da avaliação dos resultados das medições acústicas efectuadas nas diferentes localizações (diferentes locais de trabalho) onde o trabalhador realizou as suas tarefas diárias.

## 3. SELECÇÃO DE PROTECTORES AUDITIVOS

A selecção de protectores auditivos, no âmbito da legislação aplicável em vigor, isto é, do Decreto-Lei nº 182/2006, de 6 de Setembro, deve ser realizada do seguinte modo:

- Medir o nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado A, em cada banda de oitava - $L_{Aeq,f,Tk}$ - do ruído a que cada trabalhador se encontra exposto, para cada posto de trabalho que ocupa, definindo assim o espectro correspondente ao ruído *k* a que o trabalhador se encontra exposto durante *Tk* horas por dia

- Determinar os níveis globais, em dB(A) e por banda de oitava - de 63Hz a 8.000Hz - de acordo com a seguinte equação: $L_n = L_{Aeq,f,Tk} - M_f + 2s_f$ em que, $s_f$ é o valor do desvio padrão da atenuação e $M_f$ o valor médio da atenuação dos protectores auditivos em cada banda de frequência, ambos indicados pelo respectivo fabricante

- Com os níveis globais obtidos como indicado anteriormente, calcular o nível sonoro contínuo equivalente - $L_{Aeq,f,Tk}$ - de cada ruído que ocorra durante o tempo $T_k$, estando o trabalhador equipado com protectores auditivos em avaliação, recorrendo à equação: $L_{Aeq,f,Tk,efect} = 10 \log \Sigma_n 10^{0,1Ln}$

- Aplicando ao conjunto destes valores, calculados como anteriormente referido, a equação: $L_{EX,8h,efect} = 10 \log [(1/8)\Sigma_n T_k 10^{(0,1Laeq,Tk,efect)}]$, obter o valor correspondente da exposição diária efectiva do trabalhador em avaliação - $L_{EX,8h,efect}$ - em dB(A)

As medições devem ser realizadas em conformidade com o disposto no Decreto-Lei nº 182/2006, de 6 de Setembro, ou seja, deverão ser realizadas no posto de trabalho, sempre que possível, na ausência do trabalhador, com a colocação do microfone na posição em que se situaria a sua orelha mais exposta.




Figura 4 – Exemplo de avaliação de ruído ocupacional com recurso a sonómetro integrador

## 4. SELECÇÃO DE PROTECTORES AUDITIVOS RECORRENDO A DOSÍMETROS DE RUÍDO

O dosímetro de ruído a utilizar na selecção de protectores auditivos terá de permitir a análise do ruído em frequência, por bandas de 1/1 oitava, de modo a se obter o nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado A, em cada banda de oitava - $L_{Aeq,f,Tk}$ - do ruído a que o trabalhador se encontra exposto.

Uma vez que a medição é realizada de modo contínuo, ou seja, ao longo do dia de trabalho, o espectro em frequência por bandas de 1/1 oitava medido pelo dosímetro de ruído será uma "média" dos correspondentes espectros em frequência instantâneos adquiridos ao longo do dia de trabalho. Deste modo, será seleccionado o protector auditivo que proporcione a atenuação média adequada ao trabalhador equipado com o protector correctamente colocado, ou seja, será seleccionado o protector auditivo indicado para o ruído "médio" a que o trabalhador se encontra sujeito durante o seu dia de trabalho.

Uma vez que, por definição, um trabalhador "móvel" circula por diferentes áreas laborais caracterizadas por diferentes níveis de pressão sonora (caso contrário não seria necessário recorrer a um dosímetro de ruído), a selecção de um protector auditivo com base no ruído "médio" a que o trabalhador se encontra exposto poderá implicar que o protector auditivo seleccionado apresente uma atenuação excessiva para determinadas áreas (com nível de pressão sonora inferior à "média" obtida) e uma atenuação deficiente para outras áreas (com nível de pressão sonora superior à "média" obtida).

## 5. ESTUDO DE UM CASO

De modo a evidenciar o atrás exposto, analisemos o caso de um condutor de um empilhador de uma indústria de alumínio. Este trabalhador não tem área de trabalho definida, movimentando o empilhador, em função das necessidades de produção, ao longo de toda a área fabril.

De acordo com o estabelecido na norma NP EN ISO 9612:2011, este trabalhador deve ser avaliado recorrendo-se à estratégia "medição baseada no dia completo", uma vez que não é possível determinar a sua ocupação típica diária em postos ou áreas de trabalho determinados.

O $L_{EX,8h}$ - exposição pessoal diária ao ruído - e o $L_{Cpico}$ - nível de pressão sonora de pico - serão, então, determinados recorrendo a um dosímetro de ruído.

Após uma análise cuidada de toda a área fabril, foram identificadas 4 sub-áreas onde o trabalhador pode estar presente: Armazém MP, Área de Extrusão, Armazém de Perfis e Escritório.

Assim sendo, foram realizadas medições acústicas de ruído ocupacional em cada uma das 4 sub-áreas acima mencionadas, recorrendo a um sonómetro integrador com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava.

De igual modo, foram efectuadas medições baseadas no dia completo da exposição pessoal diária ao ruído do trabalhador, recorrendo a um dosímetro de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava.

Os resultados obtidos são os constantes na Tabela seguinte.

| $L_{Aeq,f,Tk}$ | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | 8 kHz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Armazém MP (sonómetro) | 38 | 44 | 57 | 67 | 72 | 62 | 54 | 49 |
| Área Extrusão (sonómetro) | 44 | 63 | 74 | 92 | 96 | 90 | 88 | 79 |
| Armazém Perfis (sonómetro) | 39 | 43 | 55 | 64 | 75 | 83 | 79 | 73 |
| Escritório (sonómetro) | 30 | 34 | 38 | 52 | 57 | 55 | 52 | 41 |
| Dia completo (dosímetro de ruído) | 38 | 52 | 63 | 80 | 84 | 80 | 77 | 69 |

Tabela 1 – Resultado das medições acústicas efectuadas

Tendo em consideração o espectro de frequência obtido com recurso ao dosímetro de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava e às características de atenuação acústica dos protectores auditivos existentes no mercado, poderíamos, por exemplo, seleccionar o protector auditivo modelo E-A-R™ ULTRAFIT™ da marca 3M Peltor, cujas características de atenuação acústica são as constantes na Tabela seguinte.

| E-A-R™ ULTRAFIT™ da 3M Peltor | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Atenuação acústica | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | 8 kHz |
| $M_f$ | 3,9 | 2,9 | 4,3 | 8,3 | 18,3 | 26,9 | 31,4 | 29,9 |
| $s_f$ | 3,0 | 1,9 | 1,7 | 3,0 | 2,2 | 2,2 | 3,4 | 3,9 |

Tabela 2 – Atenuação acústica do protector auditivo seleccionado

Da análise dos valores constantes nas duas Tabelas anteriores, resulta, de imediato, que o protector auditivo seleccionado é notoriamente insuficiente para a sub-área “Armazém MP”, não sendo necessária a sua utilização pelo trabalhador quando se encontra nas sub-áreas “Escritório” e “Armazém de Perfis”.

## 6. CONCLUSÕES

Apesar de se apresentar como uma alternativa expedita ao sonómetro integrador com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava, na selecção de protectores auditivos, o dosímetro de ruído com análise em frequência por bandas de 1/1 oitava pode conduzir a uma selecção errónea, implicando a recomendação de um protector auditivo com uma atenuação excessiva ou deficiente para uma determinada área laboral.

Estas situações devem ser claramente evitadas já que poderão ter implicações negativas quer a nível da saúde e da segurança do trabalhador, quer a nível da sua produtividade. Tanto mais, que a utilização de protectores auditivos deve ser encarada como uma solução protectiva de último recurso e, portanto, deve ser devidamente ajustada para cada caso concreto.

## 7. REFERÊNCIAS

[1] NP EN ISO 9612:2011 – Acústica. Determinação da exposição ao ruído ocupacional – Método de Engenharia

[2] IEC 61252:1993 – Electroacoustics. Specifications for personal sound exposure meters

[3] Decreto-Lei nº 182/2006, de 6 de Setembro – Prescrições mínimas de segurança e saúde em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos devidos ao ruído

[4] Catalogue for Hearing Protection Products, 3M Occupational Health & Environmental Safety Division

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ENSAIO DE APTIDÃO: RUÍDO LABORAL

**PACS: 43.15.+s**

**Jorge Fradique[1]; Fátima Inglês[2]**

[1]Sociedade Portuguesa de Acústica
Lisboa, Portugal
jorge.fradique@gmail.com

[2]Sociedade Portuguesa de Acústica
Lisboa, Portugal
fatima.ingles@gmail.com

## ABSTRACT

This paper presents the results of a proficiency test in Workplace Noise, which focused on the evaluation of exposure to noise at work.
Each laboratory measured the noise levels $L_{Aeq}$ and $L_{Cpico}$, in a workplace and determined the noise exposure level, $L_{EX,8h}$, and the associated uncertainty, according to Directive 2003/10 / EC. This proficiency test introduced a theoretical component with a set of data provided by the organization in order to evaluate more effectively the calculation methodology used by the participating laboratories.
Proficiency tests provide laboratories a prime tool for assessing their technical competence, as it allows an independent assessment of their performance. The participation in proficiency tests is also requirement of accreditation bodies, which proves particularly important for laboratories in this area, given the legal requirement of accreditation in Portugal.
This paper analyzes the results and the main conclusions of this proficiency test.

## RESUMO

Esta comunicação apresenta os resultados de um Ensaio de Aptidão em Ruído Laboral, que incidiu sobre a avaliação da exposição ao ruído durante o trabalho.
Cada laboratório caracterizou os níveis sonoros através dos parâmetros $L_{Aeq}$ e $L_{Cpico}$, num posto de trabalho e determinou a exposição diária de um trabalhador ao ruído, $L_{EX,8h}$, bem como a respetiva incerteza, de acordo com o Decreto-Lei 182/2006 e a Diretiva 2003/10/CE. Neste Ensaio de Aptidão foi introduzida uma componente teórica, com um conjunto de dados fornecidos pela organização, permitindo avaliar de forma mais eficaz a metodologia de cálculo utilizada pelos laboratórios participantes.
A participação dos laboratórios em Ensaios de Aptidão é uma ferramenta privilegiada para avaliar a sua competência técnica, pois permite uma avaliação independente do seu desempenho. Esta participação é também, cada vez mais, uma exigência das entidades acreditadoras, o que se revela particularmente importante para os laboratórios que efetuam este tipo de ensaios, dada a exigência legal da sua acreditação.
Esta comunicação analisa os resultados obtidos e as principais conclusões.

## INTRODUÇÃO

A realização de Ensaios de Aptidão (EAp) é cada vez mais uma exigência dos organismos de acreditação de laboratórios. De facto a participação continuada dos laboratórios em EAp permite demonstrar a sua competência técnica perante os organismos de acreditação e perante os próprios clientes. Por outro lado, a análise dos resultados obtidos permite também aos laboratórios corrigir ou melhorar os próprios procedimentos e técnicas de ensaio, em função da comparação com valores de referência ou, como é aqui o caso, com valores resultantes de um grande conjunto de outros laboratórios semelhantes.
Os dados apresentados no presente artigo dizem respeito ao EAp de "Acústica – Ruído Laboral", promovido pela Relacre que decorreu em 2014.
A responsabilidade técnica do EAp foi composta por elementos da Relacre e pelos autores do presente artigo.
Participaram neste EAp 40 laboratórios, dos quais apenas um não é acreditado.

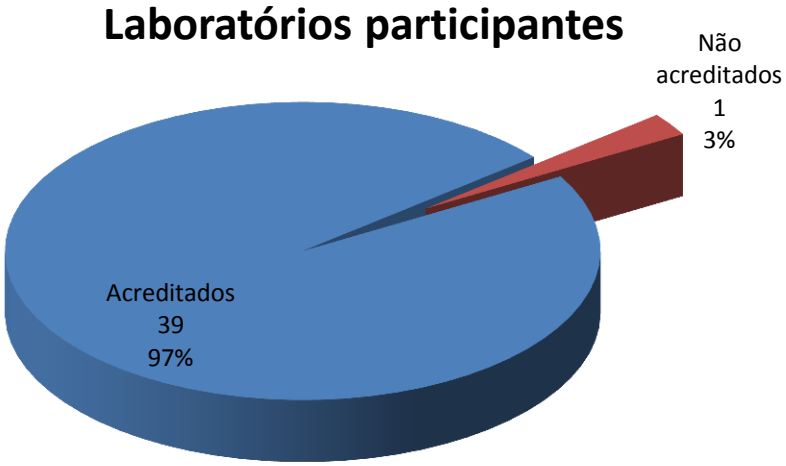



**Figura 1** – Laboratórios participantes

## LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL

A legislação aplicável à exposição de trabalhadores ao ruído nos locais de trabalho, é o Decreto-lei 182/2006 [1], que corresponde à transposição da Diretiva 2003/10/CE [2].O Decreto-lei tem caráter normativo, pois define o método de ensaio a seguir para a caracterização da exposição dos trabalhadores ao ruído.
A exposição dos trabalhadores é caracterizada em termos do nível de exposição pessoal diária ao ruído, $L_{EX,8h}$, correspondente ao nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, calculado para um período de trabalho de 8 horas, e do nível máximo de pressão sonora de pico, ponderado C, $L_{Cpico}$.

$$L_{\mathrm{EX,8h}} = L_{A,eq,T_e} + 10lg\left(\frac{T_e}{T_0}\right) \quad (1)$$

Onde,
$L_{Aeq,Te}$ – Nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, no intervalo de tempo $T_e$;
$T_e$ – Duração da exposição, em horas;
$T_0$ – Duração de referência, $T_0$=8h.

São definidos valores limite de exposição de $L_{EX,8h}$ = 87 dB(A) e de $L_{Cpico}$ = 140 dB(C). São ainda definidos valores de ação superiores de exposição, como $L_{EX,8h}$ = 85 dB(A) e de $L_{Cpico}$ = 137 dB(C) e valores de ação inferiores de exposição, como $L_{EX,8h}$ = 80 dB(A) e de $L_{Cpico}$ = 135 dB(C).
Uma alteração significativa introduzida por esta legislação relativamente à legislação anterior, para além da redução dos valores limite, foi a separação clara entre os conceitos de nível de ação e de valor limite de exposição. De facto, enquanto os níveis de ação são aplicáveis ao posto de trabalho ocupado pelo trabalhador, sem considerar qualquer proteção utilizada por este, os valores limite de exposição levam em linha de conta o efeito dos equipamentos de proteção individual utilizados. Esta nova abordagem legislativa permitiu reduzir os valores dos níveis de ação e do valor limite, aumentando o grau de proteção dos trabalhadores, sem inviabilizar determinadas atividades, para as quais o progresso da técnica ainda não permitiu uma redução significativa dos níveis sonoros produzidos. Outro aspeto inovador desta legislação, foi a obrigatoriedade de calcular e contabilizar a estimativa de incerteza na avaliação da exposição dos trabalhadores ao ruído.
No cálculo da estimativa de incerteza aplicável a estes ensaios, é seguida a metodologia definida na norma NP EN ISO 9612:2011 [3]. Para além da definição clara da metodologia de cálculo da incerteza, esta norma inclui exemplos de cálculo, que incluem o cálculo de incertezas, bem como uma folha de cálculo que permite efetuar estes cálculos de forma automática.

## METODOLOGIA

Para um ensaio deste tipo, pretende-se simular tanto quanto possível uma situação de aplicação real em que se caracteriza a exposição de trabalhadores ao ruído. Neste caso, por limitações de ordem prática, foi definida apenas uma tarefa de medição, tarefa 1, que correspondeu à caracterização da exposição do operador de um soprador de folhas.
No entanto, para melhor avaliar as metodologias de cálculo utilizadas pelos laboratórios, foi introduzida uma segunda tarefa, tarefa 2, teórica, em que os dados foram fornecidos pela organização, devendo os laboratórios integrar esta tarefa nos cálculos. Foram também fornecidos pela organização os tempos de exposição do trabalhador a uma das tarefas, bem como as características dos protetores auditivos a considerar. Os tempos estimados de exposição foram definidos como 4 h±0,5 h, para a tarefa prática, e 2 h±0,25 h para a tarefa teórica. Cada laboratório dispôs de um tempo máximo de 60 minutos para efetuar a recolha de dados, no local.
Foi também efetuada a monitorização dos níveis sonoros na sala, durante a realização do Ensaio de Aptidão.
Com base neste conjunto de dados, práticos e teóricos, os laboratórios participantes deviam apresentar os resultados calculados para a exposição pessoal diária, a exposição pessoal diária efetiva, e o valor de pico máximo. Foi ainda solicitada a apresentação do valor estimado de incerteza expandida da exposição pessoal diária, o qual deve ser contabilizado na avaliação da exposição pessoal diária do trabalhador.

Adicionalmente aos valores calculados, foi também solicitada aos laboratórios a avaliação dos resultados obtidos de acordo com o Decreto-lei 182/2006. Esta avaliação é muito importante para as empresas, pois esclarece as medidas a tomar com vista à proteção dos trabalhadores e ao cumprimento das exigências legais aplicáveis.



**Figura 2** – Local de ensaio

## TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os valores de referência para este ensaio foram calculados como os valores de consenso entre os participantes, a partir de uma análise estatística robusta. Estes valores foram usados como valores de referência para o nível sonoro contínuo equivalente da medição prática da tarefa 1, $L_{Aeq,T}$, para o valor calculado da exposição diária ao ruído, $L_{EX,8h}$, e para o valor calculado da exposição diária efetiva ao ruído, $L_{EX,8h,efect}$. Para estes valores de referência foram também calculados valores de desvio padrão, utilizando também aqui uma análise estatística robusta. Para os valores máximos de pico, $L_{Cpico}$, não foi efetuado qualquer cálculo estatístico, por se tratar de valores máximos instantâneos, sendo apenas apresentados os vários resultados obtidos pelos laboratórios.
A obtenção dos valores de consenso através da utilização de estimadores robustos, de acordo com a norma ISO 13528:2005, não exige a eliminação inicial de valores aberrantes, permitindo contabilizar nos cálculos todos os resultados dos laboratórios participantes e calcular os respetivos indicadores de desempenho.

Foi utilizado como indicador de desempenho o parâmetro *Z*-score, calculado a partir da expressão:

$$Z = \frac{(V_{Lab} - V_{Ref})}{S} \quad (2)$$

Onde,

$V_{Lab}$ – Valor do laboratório;
$V_{Ref}$ – Valor de referência;
$S$ – Unidade de desvio admissível (desvio padrão).

O desempenho do Laboratório é avaliado, por cada parâmetro ensaiado, de acordo com os seguintes critérios do valor numérico do parâmetro *Z*-score:

| Avaliação | *Z*-score | Cor |
|---|---|---|
| Desempenho Satisfatório | $\|Z\| \leq 2$ | Verde |
| Desempenho Questionável | $2 < \|Z\| < 3$ | Amarelo |
| Desempenho Insatisfatório | $\|Z\| \geq 3$ | Vermelho |

**Tabela 1** – Avaliação do parâmetro *Z*-score

A avaliação dos resultados foi efetuada para nível sonoro contínuo equivalente da medição prática, $L_{Aeq,T}$, para o valor calculado da exposição diária ao ruído, $L_{EX,8h}$, e para o valor calculado da exposição diária efetiva ao ruído, $L_{EX,8h,efect}$.

## EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a realização do ensaio, os laboratórios utilizaram os seus próprios equipamentos de medição, indicados na tabela seguinte.

| Sonómetro | | Calibrador | | Rastreabilidade |
|---|---|---|---|---|
| **BRÜEL & KJÆR** | 2250<br>2260<br>2270 | BRÜEL & KJÆR | 4231 | **ISQ** |
| **RION** | NA-27 | RION | NC-74 | |
| **01 dB** | SOLO | | | |
| **CESVA** | SC310 | CESVA | CB-5 | |
| | | | CB-6 | |
| **LARSON DAVIS** | LXT1 | LARSON DAVIS | CAL200 | |

**Tabela 2** – Equipamentos utilizados

Em todos os casos, a rastreabilidade foi dada pelo ISQ, como seria expectável, dado ser o único laboratório nacional acreditado para calibrações deste tipo de equipamentos.

## RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados apresentados pelos laboratórios participantes foram analisados tendo em conta os diversos parâmetros medidos e calculados, de acordo com a metodologia atrás descrita.

### Nível sonoro contínuo equivalente da tarefa 1, $L_{Aeq,T}$

| Laboratórios | $yi_1$ | $yi_2$ | $yi_3$ | $yi_4$ | $yi_5$ | $yi_6$ | yi | Z-score |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 92,4 | 92,5 | 92,8 | | | | 92,6 | 0,2 |
| L2 | 93,4 | 93,4 | 93,5 | | | | 93,4 | 1,0 |
| L3 | 92,5 | 92,5 | 92,3 | | | | 92,4 | 0,1 |
| L4 | 90,7 | 90,9 | 91,2 | | | | 90,9 | -1,1 |
| L5 | 90,8 | 90,8 | 92 | 92 | | | 91,4 | -0,7 |
| L6 | 92,7 | 92,8 | 92,9 | 92,8 | 93,2 | | 92,9 | 0,5 |
| L7 | 90,6 | 90,3 | 90,3 | | | | 90,4 | -1,6 |
| L8 | 92,2 | 92,3 | 92,3 | | | | 92,3 | 0,0 |
| L9 | 91,8 | 91,8 | 91,9 | | | | 91,8 | -0,4 |
| L10 | 92,7 | 93,1 | 92,6 | | | | 92,8 | 0,4 |
| L11 | 90,7 | 90,6 | 91,3 | | | | 90,9 | -1,2 |
| L12 | 92,3 | 93,5 | 92,9 | 92,8 | 92,8 | 92,8 | 92,9 | 0,5 |
| L13 | 92,7 | 92,1 | 92,9 | | | | 92,6 | 0,2 |
| L15 | 91 | 90,9 | 90,5 | | | | 90,8 | -1,3 |
| L19 | 92,6 | 92,6 | 92,6 | | | | 92,6 | 0,3 |
| L20 | 92,5 | 91,2 | 91,5 | 91,5 | | | 91,7 | -0,5 |
| L21 | 93,4 | 93,6 | 93,8 | | | | 93,6 | 1,1 |
| L22 | 93,3 | 92,3 | 91,8 | | | | 92,5 | 0,1 |
| L23 | 90,29 | 90,22 | 90,3 | | | | 90,3 | -1,7 |
| L24 | 91,1 | 92,2 | 91,6 | 92,6 | | | 91,9 | -0,3 |
| L25 | 94,4 | 94,2 | 94,6 | 94,3 | | | 94,4 | 1,8 |
| L26 | 93,4 | 93,4 | 93,2 | | | | 93,3 | 0,9 |
| L27 | 92,4 | 92,3 | 92,2 | | | | 92,3 | 0,0 |
| L28 | 93,8 | 94,2 | 94,5 | 94,7 | 94,4 | 93,5 | 94,2 | 1,6 |
| L29 | 92,5 | 93,9 | 93,1 | 93,3 | 92,9 | 93,1 | 93,1 | 0,7 |
| L30 | 90,3 | 90 | 90,2 | 90,1 | | | 90,2 | -1,8 |
| L31 | 93,2 | 93,2 | 93,6 | | | | 93,3 | 0,9 |
| L32 | 94,8 | 93,5 | 93,6 | 93,5 | 93,8 | | 93,8 | 1,3 |
| L33 | 93,1 | 93,1 | 92,8 | | | | 93,0 | 0,6 |
| L34 | 93,2 | 93,9 | 94,5 | | | | 93,9 | 1,3 |
| L35 | 93,6 | 91,6 | 91,2 | | | | 92,1 | -0,1 |
| L36 | 92,2 | 92,1 | 92,2 | 91,9 | | | 92,1 | -0,2 |
| L37 | 90,5 | 91,5 | 92 | 90,7 | 90,8 | | 91,1 | -1,0 |
| L38 | 92,56 | 92,76 | 92,27 | | | | 92,5 | 0,2 |
| L39 | 92,7 | 92,59 | 92,84 | | | | 92,7 | 0,4 |
| L40 | 91,5 | 90,8 | 90,9 | 91,3 | 91,4 | | 91,2 | -0,9 |
| L41 | 90,7 | 90,9 | 90,8 | | | | 90,8 | -1,3 |
| L42 | 91,1 | 91,2 | 91 | | | | 91,1 | -1,0 |
| L43 | 92,8 | 92,7 | 92,7 | | | | 92,7 | 0,4 |
| L44 | 92,9 | 92,9 | 93 | | | | 92,9 | 0,5 |
| | | | Média Robusta | | | | 92,3 | |
| | | | Desvio Padrão Robusto | | | | 1,19 | |

**Tabela 3** – $L_{Aeq,T}$

Na medição prática do nível sonoro contínuo equivalente da tarefa 1, todos os laboratórios obtiveram desempenho satisfatório, verificando-se em todos os casos um *Z*-score inferior a 2. Este resultado é claramente evidenciado no gráfico 1 abaixo, que representa o *Z*-score obtido pelos diversos laboratórios.




**Gráfico 1** – Z-score para $L_{Aeq,T}$

A média robusta dos valores obtidos, utilizada como valor de referência para este ensaio, teve o valor de 93,3 dB(A), sendo o correspondente desvio padrão robusto de 1,19 dB(A).
O valor do desvio padrão indicia alguma dispersão de valores entre os laboratórios, para o que contribuíram certamente as características de reverberação da sala utilizada para o ensaio, bem como eventuais variações no funcionamento do soprador de folhas, situação também detetada nos valores de monitorização.
Em todo o caso, a metodologia de medição prática seguida pelos diversos laboratórios proporcionou resultados adequados, não se verificando situações a comentar.

**Valor máximo de pico da tarefa 1, $L_{Cpico}$**

Por se tratar de um valor máximo de pico, não foi aplicado nenhum cálculo estatístico a este valor. Apresentam-se apenas os valores indicados pelos vários laboratórios. De notar, no entanto, uma dispersão de valores relativamente baixa entre os resultados, o que mais uma vez aponta para uma adequada metodologia de medição prática, seguida pelos laboratórios participantes.
De facto, com exceção do laboratório L22, que apresenta claramente um valor espúrio na primeira medição, todos os restantes valores se situam entre os 106 dB(C) e os 110 dB(C), o que corresponde a um resultado muito bom para valores de pico.
O gráfico 2 e a tabela 4 apresentam os resultados obtidos e a dispersão de valores encontrada.

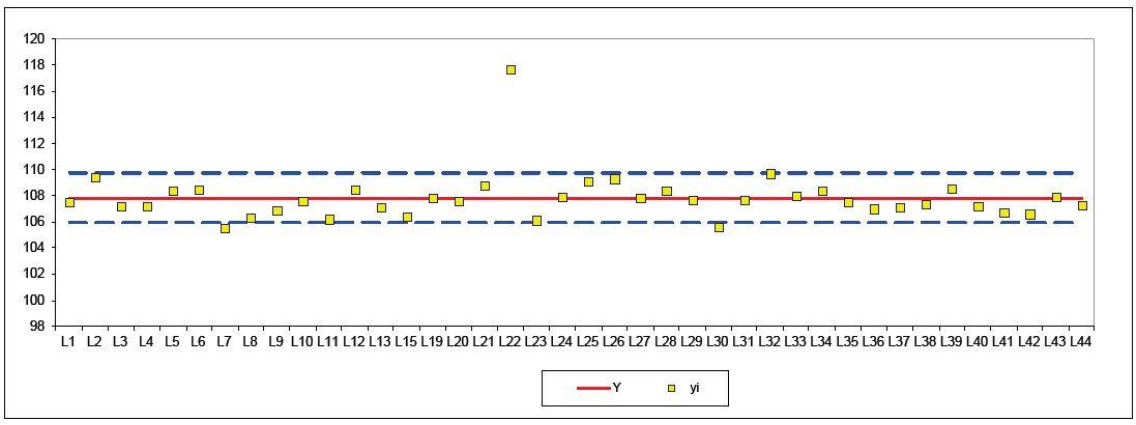



**Gráfico 2** – Dispersão de valores de $L_{Cpico}$

| Laboratórios | $yi_1$ | $yi_2$ | $yi_3$ | $yi_4$ | $yi_5$ | $yi_6$ | yi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 106,5 | 107,5 | 107,4 | | | | 108 |
| L2 | 107,6 | 107,9 | 109,4 | | | | 109 |
| L3 | 106,6 | 106,3 | 107,2 | | | | 107 |
| L4 | 106,5 | 106,2 | 107,2 | | | | 107 |
| L5 | 108,38 | 106,02 | 106,3 | 105,94 | | | 108 |
| L6 | 108,5 | 107,3 | 107,9 | 107,8 | 107,9 | | 109 |
| L7 | 104,8 | 104,2 | 105,5 | | | | 106 |
| L8 | 106,3 | 106,1 | 106,1 | | | | 106 |
| L9 | 106,8 | 106,9 | 106,8 | | | | 107 |
| L10 | 107,3 | 107,6 | 106,9 | | | | 108 |
| L11 | 106,2 | 105,4 | 106 | | | | 106 |
| L12 | 107 | 108,5 | 107 | 106,7 | 107,1 | 106,5 | 109 |
| L13 | 107,1 | 106,6 | 107,1 | | | | 107 |
| L15 | 106,4 | 106,4 | 106,3 | | | | 106 |
| L19 | 107,8 | 107 | 107,4 | | | | 108 |
| L20 | 107,6 | 105,9 | 107 | 106,6 | | | 108 |
| L21 | 107,7 | 108,6 | 108,8 | | | | 109 |
| L22 | 117,7 | 106,9 | 106,5 | | | | 118 |
| L23 | 105,62 | 105,63 | 106,12 | | | | 106 |
| L24 | 106,5 | 107,2 | 106,6 | 107,9 | | | 108 |
| L25 | 108,3 | 109,1 | 108,1 | 108 | | | 109 |
| L26 | 109,3 | 108,5 | 108,4 | | | | 109 |
| L27 | 107,8 | 107,7 | 107,2 | | | | 108 |
| L28 | 108,3 | 108,4 | 108,4 | 108,1 | 108,4 | 107,8 | 108 |
| L29 | 107,6 | 107,4 | 107,7 | 107,2 | 107,4 | 107,4 | 108 |
| L30 | 104,9 | 105,2 | 105,4 | 105,6 | | | 106 |
| L31 | 107,7 | 107,3 | 107,7 | | | | 108 |
| L32 | 109,7 | 108,6 | 108,8 | 108,6 | 108,5 | | 110 |
| L33 | 107,7 | 108 | 107,4 | | | | 108 |
| L34 | 108,4 | 107,6 | 107,4 | | | | 108 |
| L35 | 107,5 | 106,9 | 106,8 | | | | 108 |
| L36 | 106,8 | 106,2 | 107 | 106,7 | | | 107 |
| L37 | 105,6 | 107,1 | 106,9 | 106,3 | 106,3 | | 107 |
| L38 | 107,14 | 107,35 | 106,82 | | | | 107 |
| L39 | 108,52 | 108,11 | 108,03 | | | | 109 |
| L40 | 106,6 | 106,3 | 106,6 | 106,5 | 107,2 | | 107 |
| L41 | 105,8 | 106,7 | 105,7 | | | | 107 |
| L42 | 106,6 | 106,2 | 106,4 | | | | 107 |
| L43 | 107 | 107 | 107,9 | | | | 108 |
| L44 | 107,3 | 107 | 107,1 | | | | 107 |
| | | | Valor máximo | | | | 118 |

**Tabela 4** – $L_{Cpico}$

**Exposição pessoal diária ao ruído, $L_{EX,8h}$**

Para o cálculo da exposição pessoal diária ao ruído, os laboratórios deviam considerar os valores medidos para a tarefa 1, os valores fornecidos pela organização para a tarefa 2 e os tempos de exposição também fornecidos pela organização, para ambas as tarefas.
Pretendia-se ainda que os laboratórios apresentassem um valor de estimativa de incerteza para este parâmetro.
Neste caso, com base nos resultados relativos à tarefa 1 apresentados pelos laboratórios, os responsáveis técnicos pelo ensaio (RTE) efetuaram o cálculo de $L_{EX,8h}$ e da respetiva incerteza, de modo a melhor avaliar os valores calculados pelos laboratórios. Estes valores são apresentados na tabela 5, abaixo.
Também neste parâmetro se verificou que todos os laboratórios obtiveram desempenho satisfatório, verificando-se em todos os casos um *Z*-score inferior a 2. Este resultado é claramente evidenciado no gráfico 3 abaixo, que representa o *Z*-score obtido pelos diferentes laboratórios.

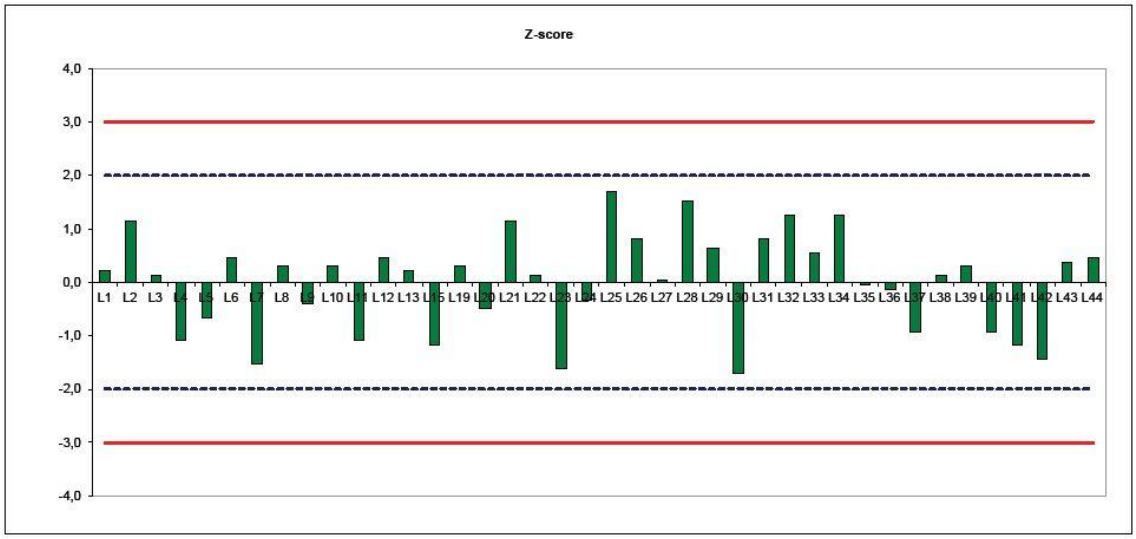



**Gráfico 3** – Z-score para $L_{EX,8h}$

No entanto, comparando os resultados com os cálculos dos RTE, verifica-se que em dois casos, nos laboratórios L8 e L42, assinalados a púrpura, existem diferenças de algumas décimas entre o valor apresentado pelo laboratório e o valor calculado pelos RTE.
Também para o cálculo de incerteza se encontram diferenças superiores a uma décima entre os valores apresentados pelos laboratórios L2, L3, L4, L6, L10, L13, L22, L31, L32, L34, L39 e L43, e os valores calculados pelos RTE.
Embora na generalidade as diferenças encontradas sejam de poucas décimas, é de realçar que o valor da incerteza é contabilizado na avaliação da exposição trabalhador, pelo que é muito importante que estes laboratórios corrijam os seus cálculos. De notar que estas incorreções no cálculo de incerteza ocorreram em 30 % dos laboratórios participantes.
Já no que respeita à avaliação de acordo com o Decreto-Lei 182/2006 de 6 de setembro, os resultados são francamente piores. De facto, apenas 9 laboratórios, ou seja, 22,5 % dos participantes, apresentaram uma avaliação correta dos resultados, à luz do DL 182/2006. Na coluna “Avaliação” da tabela 5 estão assinalados com “C” os 9 laboratórios cuja avaliação foi considerada correta. Dos restantes, a letra “P” corresponde a uma avaliação parcial, ou seja, incompleta, o que se verificou em 10 laboratórios, correspondendo a 25 % dos participantes. A letra “I” corresponde a uma avaliação incorreta, o que se verificou em 4 laboratórios, isto é, em 10 % dos participantes. 17 Laboratórios, ou seja 22,5 % dos participantes, identificados com o número “0”, não apresentaram qualquer avaliação de acordo com o DL 182/2006.

| Laboratórios | Exposição diária ao ruído, Lex, 8h | U | Z-score | Calculo RTE | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $L_{EX,8h}$ | U | Avaliação |
| L1 | 89,9 | 2,1 | 0,2 | 89,9 | 2,1 | P |
| L2 | 91 | 1,8 | 1,2 | 90,7 | 2,1 | I |
| L3 | 89,8 | 1,9 | 0,1 | 89,8 | 2,1 | C |
| L4 | 88,4 | 1,8 | -1,1 | 88,4 | 2,0 | P |
| L5 | 88,9 | 2,1 | -0,7 | 88,9 | 2,1 | P |
| L6 | 90,2 | 1,8 | 0,5 | 90,2 | 2,1 | 0 |
| L7 | 87,9 | 2,0 | -1,5 | 87,9 | 2,0 | C |
| L8 | 90 | 1,9 | 0,3 | 89,6 | 2,0 | I |
| L9 | 89,2 | 1,9 | -0,4 | 89,2 | 2,0 | P |
| L10 | 90 | 1,68 | 0,3 | 90,1 | 2,1 | C |
| L11 | 88,4 | 2 | -1,1 | 88,4 | 2,0 | C |
| L12 | 90,2 | 2 | 0,5 | 90,2 | 2,1 | 0 |
| L13 | 89,9 | 1,9 | 0,2 | 89,9 | 2,1 | P |
| L15 | 88,3 | 1,9 | -1,2 | 88,3 | 2,0 | P |
| L19 | 90,0 | 2,1 | 0,3 | 89,9 | 2,1 | 0 |
| L20 | 89,1 | 2,1 | -0,5 | 89,1 | 2,1 | C |
| L21 | 91 | 2,0 | 1,2 | 90,9 | 2,1 | 0 |
| L22 | 89,8 | 2,0 | 0,1 | 89,8 | 2,2 | 0 |
| L23 | 87,8 | 2 | -1,6 | 87,8 | 2,0 | P |
| L24 | 89,3 | 2,1 | -0,3 | 89,3 | 2,1 | 0 |
| L25 | 91,6 | 2,1 | 1,7 | 91,6 | 2,1 | C |
| L26 | 90,6 | 2,1 | 0,8 | 90,6 | 2,1 | 0 |
| L27 | 89,7 | 2 | 0,0 | 89,7 | 2,0 | 0 |
| L28 | 91,4 | 2,1 | 1,5 | 91,4 | 2,1 | P |
| L29 | 90,4 | 2,1 | 0,6 | 90,4 | 2,1 | 0 |
| L30 | 87,7 | 2 | -1,7 | 87,7 | 2,0 | 0 |
| L31 | 90,6 | 2,8 | 0,8 | 90,6 | 2,1 | 0 |
| L32 | 91,1 | 1,9 | 1,3 | 91,1 | 2,1 | I |
| L33 | 90,3 | 2 | 0,6 | 90,3 | 2,1 | 0 |
| L34 | 91,1 | 2,0 | 1,3 | 91,1 | 2,2 | 0 |
| L35 | 89,6 | 2,3 | -0,1 | 89,6 | 2,3 | 0 |
| L36 | 89,5 | 2 | -0,1 | 89,5 | 2,0 | P |
| L37 | 88,6 | 2,1 | -0,9 | 88,6 | 2,1 | P |
| L38 | 89,8 | 2,1 | 0,1 | 89,9 | 2,1 | C |
| L39 | 90 | 1,9 | 0,3 | 90,0 | 2,1 | 0 |
| L40 | 88,6 | 1,9 | -0,9 | 88,6 | 2,0 | C |
| L41 | 88,3 | 1,9 | -1,2 | 88,3 | 2,0 | 0 |
| L42 | 88 | 1,9 | -1,4 | 88,6 | 2,0 | 0 |
| L43 | 90,1 | 5,4 | 0,4 | 90,1 | 2,1 | C |
| L44 | 90,2 | 2,1 | 0,5 | 90,2 | 2,1 | I |
| | Média robusta | 89,7 | | | | |
| | Desvio padrão robusto | 1,15 | | | | |

**Tabela 5** – $L_{EX,8h}$, incerteza respetiva, e valores calculados pelos RTE

| Avaliação DL 182/2006 | Laboratórios Número/percentagem | Exemplos retirados das fichas de resultados |
|---|---|---|
| **C (Correta)** | 9 / 22,5 % | "Analisando os resultados, verifica-se o seguinte:<br>• O valor obtido de LEX,8h+U (90 dB(A)) é superior ao "Valor de Ação Superior (85 dB(A))";<br>• O valor obtido de Lcpico (115 dB(C)) é inferior ao "Valor de inferior (135 dB(C))";<br>• O valor obtido de LEX,8h,efect (67 dB(A)) é inferior ao "Valor limite (87 dB(A))"" |
| **P (Parcial)** | 10 / 25 % | "de acordo com o ponto 2 do art.º 3, o trabalhador não está sujeito a níveis de ruído iguais ou superiores ao limite de exposição, para a exposição efectiva diária e para o Lcpico." |
| **I (Incorreta)** | 4 / 10 % | "De acordo com a legislação em vigor verifica-se que o operador de jardinagem encontra-se exposto a valores acima dos valores limite de exposição e como tal tem que utilizar os protetores auriculares no decorrer das suas tarefas." |
| **0 (Inexistente)** | 17 / 42,5 % | - |

**Tabela 6** – Avaliação de acordo com o Decreto-Lei 182/2006 de 6 de setembro

A tabela 6 resume os resultados encontrados na Avaliação de acordo com o Decreto-Lei 182/2006 de 6 de setembro. Face aos resultados verificados, é possível que os laboratórios não tenham interpretado adequadamente o que se pretendia na ficha de resultados em que foi solicitada esta avaliação.

**Exposição pessoal diária efetiva ao ruído, $L_{EX,8h,efect}$**

Para o cálculo da exposição pessoal diária efetiva ao ruído, os laboratórios deviam considerar os valores anteriormente calculados da exposição pessoal diária, e calcular a exposição efetiva considerando os dados dos protetores fornecidos pela organização.
Também neste caso, a média robusta dos valores obtidos foi utilizada como valor de referência para o ensaio, sendo o valor calculado de 67,3 dB(A), com um correspondente desvio padrão robusto de 0,71 dB(A). A dispersão encontrada neste parâmetro é menor do que nos anteriores, o que seria expectável na medida em que são introduzidos mais cálculos intermédios com valores que não possuem dispersão, como é o caso das atenuações dos protetores auditivos, iguais para todos os laboratórios.
A avaliação deste parâmetro foi a única em que se verificaram valores de *Z*-score superiores a 2. De facto, o laboratório L6 apresenta um desempenho questionável, e os laboratórios L2, L10, L23, L29, L30 e L32 apresentam mesmo desempenhos insatisfatórios.
Para estes casos, os RTE calcularam um valor de $L_{EX,8h,efect}$ com base nos valores dos laboratórios.
Todos estes dados se encontram na tabela 7, abaixo.

| Laboratórios | Exposição diária efetiva ao ruído, Lex, 8h, efect | Z-score | Cálculo RTE |
|---|---|---|---|
| L1 | 67 | -0,4 | |
| L2 | 70 | 3,8 | 67,5 |
| L3 | 67,3 | 0,0 | |
| L4 | 67,4 | 0,2 | |
| L5 | 67 | -0,4 | |
| L6 | 69,2/68,9 | 2,7 | 67,8 |
| L7 | 67 | -0,4 | |
| L8 | 66 | -1,8 | |
| L9 | 67,2 | -0,1 | |
| L10 | 73 | 8,1 | 67,8 |
| L11 | 66,6 | -1,0 | |
| L12 | 67 | -0,4 | |
| L13 | 67 | -0,4 | |
| L15 | 67 | -0,4 | |
| L19 | 67,4 | 0,2 | |
| L20 | 67,1 | -0,3 | |
| L21 | 68 | 1,0 | |
| L22 | 67 | -0,4 | |
| L23 | 65 | -3,2 | 66,5 |
| L24 | 67,2 | -0,1 | |
| L25 | 68 | 1,0 | |
| L26 | 66,2 | -1,5 | |
| L27 | 68 | 1,0 | |
| L28 | 68,1 | 1,2 | |
| L29 | 59 | -11,7 | 67,5 |
| L30 | 69,9 | 3,7 | 69,9 |
| L31 | 68 | 1,0 | |
| L32 | 62 | -7,4 | 69,2 |
| L33 | 67 | -0,4 | |
| L34 | 67,3 | 0,0 | |
| L35 | 67,2 | -0,1 | |
| L36 | 67,1 | -0,3 | |
| L37 | 66,8 | -0,7 | |
| L38 | 67 | -0,4 | |
| L39 | 67,6 | 0,5 | |
| L40 | 68 | 1,0 | |
| L41 | 67,1 | -0,3 | |
| L42 | 67 | -0,4 | |
| L43 | 67,7 | 0,6 | |
| L44 | 67,6 | 0,5 | |
| Média robusta | 67,3 | | |
| Desvio padrão robusto | 0,71 | | |

**Tabela 7** – $L_{EX,8h,efect}$ , *Z*-score respetivo, e valores calculados pelos RTE

O gráfico 4, abaixo, representa o *Z*-score obtido pelos diferentes laboratórios para o parâmetro $L_{EX,8h,efect}$. Neste caso estão claramente identificados os laboratórios que obtiveram desempenhos questionáveis e inaceitáveis. Estes desempenhos ficam certamente a dever-se a deficiências no cálculo dos níveis sonoros considerando a atenuação dos protetores auditivos.

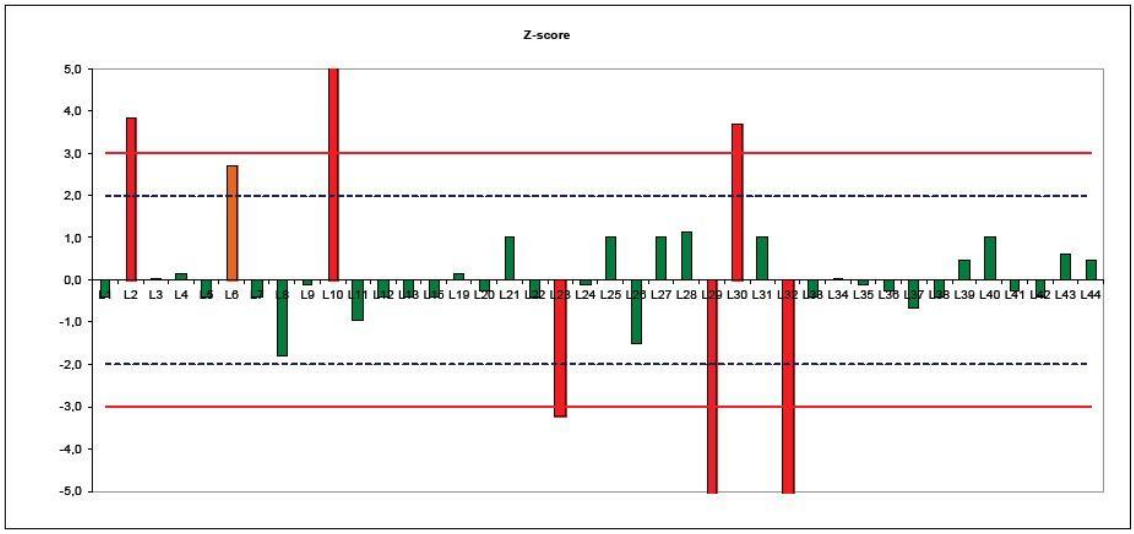



**Gráfico 4** – Z-score para $L_{EX,8h,efect}$

## CONCLUSÕES

As conclusões dos resultados foram já discutidas ao longo da apresentação das avaliações de cada parâmetro.
Como conclusão geral do ensaio de aptidão podemos afirmar que os resultados da maioria dos laboratórios foram muito positivos, e demonstram a boa capacidade para a realização deste tipo de medições.
Verificam-se ainda algumas pequenas situações ao nível cálculo de incertezas, que os laboratórios em causa devem corrigir.
Também no cálculo da exposição pessoal diária efetiva se verificam cálculos incorretos em sete laboratórios, originando as situações de *Z*-score superior a 2, encontradas. Mais uma vez os laboratórios afetados devem tentar identificar os erros de cálculo, com vista à sua correção.
Por último, a questão aparentemente mais grave relativa à interpretação dos resultados, face ao DL 182/2006. Aparentemente não terá sido corretamente interpretado o que se pretendia dos laboratórios nesta questão, até porque, nos relatórios usuais de alguns dos laboratórios em causa, esta interpretação é habitualmente tratada corretamente. Não deixa de ser necessário algum cuidado sobre esta questão, até porque está em causa muitas vezes, a atuação do empregador relativamente aos trabalhadores expostos a ruído, que, sendo mal interpretada pode conduzir a situações de menor proteção dos trabalhadores, podendo contribuir para o agravamento dos efeitos nefastos da exposição a níveis de ruído excessivos.

## REFERÊNCIAS

[1] Decreto-Lei 182/2006, de 6 de setembro.

[2] DIRETIVA 2003/10/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 6 de fevereiro de 2003, relativa às prescrições mínimas de segurança e saúde em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos devidos aos agentes físicos (ruído).

[3] NP EN ISO 9612:2011. Acústica. Determinação da exposição ao ruído ocupacional. Método de engenharia.






Cadna R®
Cálculo y Evaluación
de Sonido Interior




## Nuevo! CadnaR 2.3

DataKustik

### Novedades CadnaR 2015

- Gestione grandes proyectos con la versión de 64 Bit
- Importe archivos CAD y SketchUp
- Calcule en base a valores de emisión de acuerdo a la serie de normas ISO 3740
- Utilice datos de medida para adaptar su modelo de emisión
- Calcule resultados en una trayectoria de medida simulada según la norma ISO 3382-3:2012
- Evalúe los requisitos de calidad acústica de oficinas según la norma VDI 2569 (Draft 2015)

DataKustik

**DataKustik GmbH — Oficina España**
C/Calera, 3 — Loft 49
28760 — Tres Cantos Madrid

Teléfono: 91 219 08 78
info@datakustik.de
www.datakustik.de

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ONVIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ENSAIOS DE RUÍDO OCUPACIONAL SENSIBILIZAR, EDUCAR E FORMAR

PACS:43.50.-x

Virgínia C. Gomes[(1)]; Carlos César Rodrigues[(2)]
[(1)]Téc. Superior Segurança, Mestre Saúde Ocupacional; [(2)]Instituto Superior Engenharia Lisboa
[(1)]Rua da Igreja, 191; 3750-362 Belazaima do Chão – Águeda; Portugal; Tel: (+351) 934637437; virfgomes@gmail.com
[(2)] Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; crodrigues@adf.isel.pt

## ABSTRACT

The vast experience achievedby the authors of the present paper in terms of occupational noise assessment, allowed the identification ofthe disabled and sometimes non-existent experimental technical training, as the main gap observed in the acoustics measurement technicians and, mainly, in the legal supervisiontechnicians.

Therefore, the authors of the present paper consider that it is urgent to overcome that gap, through appropriate sessions of awareness, education and training, which have to incorporate, at least, the relevant topics that will be discussed throughout this paper.

## RESUMO

A vasta experiência dos autores do presente artigo em termos de avaliação de ruído ocupacional, permitiu identificar a deficiente e algumas vezes inexistente formação técnico-experimental, como a principal lacuna observada quer nos técnicos responsáveis pela realização dos ensaios acústicos quer, principalmente, pelos técnicos das entidades fiscalizadoras com competências atribuídas nesta matéria.

Assim sendo, consideram os autores do presente artigo que urge colmatar aquela lacuna, através de adequadas sessões de sensibilização, educação e formação, que integrem, no mínimo, os tópicos relevantes que serão discutidos ao longo deste artigo.

## 1. INTRODUÇÃO

As campanhas “Locais de Trabalho Seguros e Saudáveis”, da Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho, têm incidido, maioritariamente, em ações de sensibilização direcionadas aos trabalhadores e às respetivas entidades empregadoras, na área da prevenção dos riscos nos locais de trabalho.

A ação “Ruído no trabalho – pode custar-lhe mais do que a audição”, que teve lugar em 2005, veio reforçar a importância da necessidade de se investigar de modo mais assertivo as questões relacionadas com a prevenção dos riscos nos locais de trabalho, sendo que, à data de hoje, continuam a subsistir muitas dúvidas e muitas opiniões, nem sempre convergentes.

Tendo em linha de conta que as campanhas de sensibilização têm como objetivo primordial a mudança de comportamentos e de atitudes ao nível da prevenção e/ou correção dos fatores que conduzem ao aparecimento de doença, entendem os autores do presente artigo que as mesmas, como uma ação isolada, são manifestamente insuficientes.

É necessário sensibilizar, educar e formar, mas também monitorizar!

Não é suficiente lançar campanhas, se não estiver devidamente definida a metodologia que permita abranger as diferentes entidades. Por outro lado, é indispensável que se definam, de modo claro, as áreas de formação dos técnicos, especialmente no que diz respeito ao inevitável trabalho experimental que têm de realizar.

É, portanto, imperioso que exista uma parceria com o objectivo de promover uma colaboração proativa e eficaz entre os diversos intervenientes, nomeadamente, Governo/ Universidades/ Escolas/ Programas Curriculares/ Serviços de Saúde/ Serviços de Inspeção/ Seguradoras/ Consultores/ Técnicos e Empresas em geral.

De facto, a eficácia resultante dos ensaios de ruído ocupacional depende, quase que exclusivamente, da formação técnico-experimental dos técnicos que realizam as medições acústicas e a posterior análise dos valores obtidos nas situações avaliadas.

A normalização e a legislação portuguesa atualmente em vigor em termos da exposição ao ruído ocupacional, ainda que consideravelmente ampla e clara, apresenta uma relevante lacuna, que urge colmatar, no que respeita à demonstração periódica das capacidades técnico-experimentais dos técnicos que efetuam os ensaios acústicos.

Estes últimos, tal como legalmente disposto, têm de deter formação específica em matéria de medição de ruído ocupacional, mas não se encontrando estabelecido o perfil necessário para o cumprimento daquela formação específica, a situação resultante reveste-se de um vazio que em nada melhora as condições de controlo dos riscos inerentes à exposição diária dos trabalhadores ao ruído durante o trabalho.

## 2. ACREDITAÇÃO

É no ano de 1978 que surge, a nível internacional, o primeiro guia para laboratórios de ensaio, ISO/IEC Guia 25, alterado em1982 e em 1990, por ser necessário adaptar os requisitos outrora especificados. Em 1999 é lançada a EN ISO/IEC 17025 substituindo aquele Guia, sendo que em 2005 é publicada a correspondente versão portuguesa – NP EN ISO/IEC17025.

Esta norma define os requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e/ou de calibração, segundo metodologias normalizadas, não normalizadas ou desenvolvidas pelos próprios laboratórios. Destina-se a ser utilizada na definição e na melhoria dos sistemas de gestão da qualidade dos laboratórios, bem como das respetivas atividades técnicas e administrativas.

### 2.1 Organização

Em termos de organização geral dos laboratórios, a NP EN ISO/IEC17025 estabelece alguns princípios importantes, dos quais se destacam os seguintes:

- O laboratório deve constituir-se como uma entidade jurídica com responsabilidades bem definidas na realização das atividades que se propõe desenvolver, assegurando a não ocorrência de qualquer conflito de interesses

- O laboratório deve garantir que o seu pessoal técnico e de gestão desempenha as respetivas funções com autoridade, dispondo dos meios necessários para poder identificar a ocorrência de eventuais desvios ao estabelecido no sistema de gestão, bem como aos procedimentos experimentais de ensaio e/ou de calibração, devendo desencadear as correspondentes ações minimizadoras, sejam estas de carácter preventivo ou de carácter corretivo

- O laboratório deve proceder de modo a evitar o seu envolvimento em quaisquer atividades que possam diminuir a confiança na sua competência, imparcialidade, capacidade de avaliação ou integridade operacional

- O laboratório deve especificar, de modo explícito, a responsabilidade, a autoridade e as inter-relações entre todas as pessoas que gerem, executam ou verificam qualquer trabalho que possa afectar a qualidade dos ensaios e/ou das calibrações efectuadas

- O laboratório deve providenciar a adequada supervisão do pessoal que realiza ensaios e/ou calibrações, incluindo eventuais estagiários, supervisão esta que deve ser efetuada por técnicos devidamente familiarizados com os métodos e os procedimentos experimentais e de gestão aprovados, com os objectivos de cada ensaio e/ou calibração e com a avaliação dos respetivos resultados

- O laboratório deve possuir uma gestão técnica, que sendo responsável por todas as atividades de caráter técnico-experimental, assegura, também, a disponibilização dos recursos, materiais e humanos, necessários à garantia da qualidade exigida

- O laboratório deve prever a nomeação de substitutos, sempre que tal seja considerado viável

- O laboratório deve assegurar que o seu pessoal se encontra consciente da relevância das atividades que desenvolve, bem como do modo como contribuem para atingir os objetivos atempadamente definidos

## 2.2 Sistema de Gestão

Em termos do sistema de gestão dos laboratórios, a NP EN ISO/IEC17025 estabelece, igualmente, alguns princípios importantes, dos quais se destacam os seguintes:

- O compromisso da gestão do laboratório em cumprir o disposto na NP EN ISO/IEC17025, melhorando continuamente a eficácia do sistema de gestão

- O compromisso da gestão do laboratório quanto às boas práticas profissionais dos seus colaboradores, bem como à garantia da qualidade dos serviços prestados aos respetivos clientes

- O compromisso da gestão do laboratório em garantir que todo o seu pessoal se encontra devidamente familiarizado com a documentação da qualidade, aplicando as correspondentes políticas e procedimentos em todo o trabalho efectuado

A gestão de topo deve, entre outros:

- Evidenciar o seu comprometimento com o desenvolvimento e a implementação do sistema de gestão e com a melhoria contínua da sua eficácia

- Comunicar à organização a importância de satisfazer os requisitos do cliente, bem como os requisitos estatutários e regulamentares

- Garantir que, quando do planeamento e da implementação das alterações ao sistema de gestão, a integridade do mesmo se mantém

Em termos técnicos, a credibilidade dos ensaios e/ou das calibrações levadas a cabo pelo laboratório, está associada a um conjunto de fatores importantes, dos quais se destacam os seguintes:

- Fatores humanos

- Métodos de ensaio e/ou de calibração e respetiva validação

- Manuseamento de itens a ensaiar e/ou a calibrar

- Instrumentação

- Instalações e condições ambientais

- Rastreabilidade e amostragem

A maior ou menor amplitude destes fatores, contribui para a incerteza total dos resultados obtidos, sendo, portanto, indispensável para a melhoria da qualidade dos serviços prestados pelo laboratório, que este garanta que os seus técnicos dispõem da qualificação e dos meios materiais adequados.

Os clientes que procuram laboratórios de ensaio e/ou de calibração têm como requisito indispensável que estes demonstrem a sua credibilidade e que, por sua vez, os resultados obtidos evidenciem a necessária confiança.

Um laboratório cujos métodos de ensaio e/ou de calibração se encontrem acreditados por entidades com competência na matéria, evidencia a sua competência técnico-experimental para os serviços que se propõe realizar.

Deste modo e consubstanciado pelo atrás exposto, consideram os autores do presente artigo ser imprescindível tornar como exigência legal a acreditação dos laboratórios que realizam ensaios de ruído ocupacional, como garantia da qualidade dos resultados obtidos, bem como das eventuais ações de monitorização e controlo.

## 3. PREVENÇÃO DE RISCOS PROFISSIONAIS

A Lei nº 102/2009, de 10 de Setembro, alterada e republicada pela Lei nº 3/2014, de 28 de Janeiro, nos artigos 9º e 10º, destaca a importância da educação, da formação e da informação para a segurança e a saúde no trabalho em termos dos currículos escolares de vários níveis de ensino, com o objectivo de alcançar uma cultura de prevenção no quadro geral do sistema educativo e da prevenção dos riscos profissionais como preparação para a vida ativa.

Nos referidos artigos encontra-se estabelecido que compete ao Estado a definição daqueles conteúdos programáticos, a promoção da respetiva integração e a realização de adequadas ações de formação e informação destinadas a empregadores e a trabalhadores, para além de outros esclarecimentos públicos que se justifiquem.

Além do mais, encontra-se ainda estabelecido que é ao Estado que compete assegurar as condições necessárias à promoção do conhecimento e da contínua investigação na área da

segurança e da saúde no trabalho, apoiando o desenvolvimento de unidades de investigação bem como a formação de especialistas e investigadores.

Por outro lado, a colaboração de várias estruturas nacionais com intervenção na segurança e na saúde no trabalho, a divulgação da informação técnica e científica que contribua para o avanço do conhecimento e do progresso da investigação, o incentivo à participação em programas internacionais e ao estudo de boas práticas em matéria de sistemas de organização e funcionamento das atividades de prevenção, são outros dos caminhos a seguir.

O progresso da investigação, do desenvolvimento experimental e da demonstração deve orientar-se, predominantemente, no sentido da melhoria da prevenção dos riscos profissionais e da proteção da saúde do trabalhador.

A Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho define, na sua Ficha (FACTS) 103, as estratégias de formação de professores para o ensino da prevenção de riscos profissionais.

Muito embora a supracitada Agência considere que o êxito dos projetos dependerá, sempre, das abordagens pragmáticas aplicadas ao contexto das necessidades de cada escola, apresentam-se, em seguida, alguns dos aspectos estratégicos a desenvolver:

- A formação deve ser inserida numa abordagem global da escola, que associe o ensino da prevenção de riscos à promoção da melhoria da gestão da segurança e da saúde no trabalho, fomentando uma cultura que estimule a participação activa de todos os professores

- A formação de qualquer futuro professor deve incluir noções elementares sobre segurança e saúde no trabalho nas escolas, bem como sobre métodos de integração da prevenção de riscos nas atividades diárias de ensino

- Os directores das escolas devem receber formação suplementar que lhes confira os adequados conhecimentos específicos sobre a gestão da segurança e da saúde no trabalho e a integração do ensino da prevenção de riscos na atividade diária das escolas

- Os restantes professores devem, também, receber formação suplementar,de modo a adquirirem os necessários conhecimentos específicos em matéria de segurança e de saúde no trabalho, bem como de ensino da prevenção de riscos

- Deve ser assegurada a ligação, em rede, entre as diversas escolas, de modo a facilitar a transmissão de conhecimentos na área da segurança e da saúde no trabalho e do ensino da prevenção de riscos, com o objetivo importante de manter os restantes trabalhadores atualizados e de partilhar e trocar experiências

- Deve ser garantida a cooperação e a participação de um vasto conjunto de intervenientes, nomeadamente:

    - Autoridades educativas

    - Entidades de ensino da prevenção de riscos (escolas de saúde, organismos de prevenção de acidentes profissionais, de segurança rodoviária e desportivos)

    - Sindicatos e associações profissionais de professores

Face ao exposto, perece evidente que se torna urgente a tomada de medidas governamentais, implementando no terreno as diversas propostas de ação que permitam, tanto quanto possível, evitar as nefastas consequências para a segurança e a saúde do trabalhador.

## 4. FORMAÇÃO TÉCNICO-EXPERIMENTAL – PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO

Atualmente, as unidades curriculares dos cursos que formam técnicos de higiene e segurança no trabalho e técnicos superiores de higiene e segurança no trabalho, apresentam lacunas evidentes ao nível da resolução de casos práticos em contexto real de trabalho.É, por isso, indispensável, que se defina planos curriculares que, adequadamente, as suprimam.

Por exemplo, a parceria entre escolas e empresas é vital no sentido de permitir aos formandos o adequado conhecimento e a experiência ativa da vida em contexto real de trabalho. Conhecer as diferentes indústrias, os processos de fabrico, o parque de máquinas, entre outros, são fatores chave para o desenvolvimento de um bom profissional.

Também no entender dos autores do presente artigo, deveriam as unidades curriculares dos supracitados cursos apresentar matrizes de classificação, que permitam aos formandos atingir patamares na sua actividade profissional que lhes garanta créditos na respectiva carreira.

O regime de acesso à profissão de técnico de higiene e segurança no trabalho e de técnico superior de higiene e segurança no trabalho define que a respetiva atividade profissional se baseia em princípios deontológicos, nomeadamente em conhecimentos científicos e em competência técnica, os quais devem ser objecto de constante atualização.

Esta atualização de conhecimentos pode e deve ser efetuada, quer ao nível interno quer ao nível externo do laboratório em que o técnico presta serviço.

Se nos reportarmos à acreditação dos laboratórios que realizam ensaios de ruido ocupacional e tal como atrás referido, identifica-se, de imediato, a necessidade de definir as áreas em que os técnicos devem obter e/ou aperfeiçoar os seus conhecimentos, designadamente:

- Validação de métodos
    - Auditorias de medição e ensaios de comparação interlaboratorial
    - Instalações e condições ambientais
    - Rastreabilidade dos resultados dos ensaios e amostragem
- Instrumentação de medição e análise de ruído
- Tipologia de ensaios não conformes
- Cálculo de incertezas

Assim sendo, todas as ações de educação, formação e informação devem ser desenvolvidas não apenas para os técnicos que realizam ensaios de ruído ocupacional mas igualmente para os técnicos das entidades fiscalizadoras nesta matéria. Para tal, devem ser criados programas governamentais, onde a formação seja desenvolvida, por exemplo, através de:

- Aprendizagem em e-learning
- Aprendizagem mista (combinação de formação à distância com formação presencial)
- Criação de uma plataforma eletrónica, supervisionada por entidade fiscalizadora, onde seja possível desenvolver programas de formação
- Criação, a nível nacional, de uma rede alargada de parceiros, designadamente: Governo/Universidades/Escolas/Programas Curriculares/Serviços de Saúde/Serviços

de Inspeção/Seguradoras/Consultores/Técnicos e Empresas em geral, que com um papel ativo nestas temáticas, potenciem:

- A formação, interna e/ou externa, devidamente validada pela plataforma
- A participação na formação de técnicos de ensaios
- A participação em programas de consulta nacionais e internacionais
- O acesso a matrizes de resultados
- A criação e o desenvolvimento de linhas de investigação

A monitorização evolutiva dos programas de sensibilização, educação e formação, em matéria de ruído ocupacional, deve ser efetuada mediante as evidências comprovadas pelos técnicos de ensaio, estando acometida a avaliação da respetiva rastreabilidade às entidades competentes.

## 5. CONCLUSÕES

A avaliação dos riscos devidos à exposição dos trabalhadores ao ruído ocupacional determina, como exposto, que a competência técnico-experimental dos técnicos responsáveis pelos ensaios acústicos e pela análise dos correspondentes resultados se encontre superiormente assegurada.

Deste modo, urge sensibilizar os diferentes intervenientes neste processo de forma a garantir que aquela avaliação de riscos é adequadamente efetuada, tendo por base o mais recente estado da arte.

Entendem, portanto, os autores do presente artigo, que deve o Estado assegurar que a avaliação da exposição ao ruído ocupacional caminhe no sentido de uma maior responsabilização por parte de todos os intervenientes, sendo que a exigência legal da acreditação dos laboratórios que avaliam a exposição dos trabalhadores ao ruído durante o trabalho, permitiria que os respetivos técnicos fossem regularmente avaliados, designadamente em termos dos métodos de medição, análise e controlo utilizados.

## 6. REFERÊNCIAS

[1] NP EN ISO/IEC 17025:2005 – Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração

[2] Lei nº 102/2009, de 10 de Setembro, alterada e republicada pela Lei nº 3/2014, de 28 de Janeiro – Regime Jurídico da Promoção da Segurança e Saúde no Trabalho

[3] http://osha.europa.eu/en/publications/factsheets

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# EL PAISAJE SONORO URBANO. INTRUSIONES Y PERCEPCIONES

PACS: 43.50.Qp

Atanasio-Moraga, Pedro[1]; Barrigón-Morillas, Juan M.[1]; Rey-Gozalo, Guillermo[2]; Montes-González, David[1]; Prieto- Gajardo, Carlos[1].

[1] Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España
Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03
E-mail: pedroam@unex.es

[2] Universidad Autónoma de Chile, 5 Poniente 1670,
3460000 Talca, Región del Maule, Chile;
E-mail: greyg@uautonoma.cl

## ABSTRACT

Although the recent ISO 12913-1 states that the soundscape has to refer to the acoustic environment perceived in context, we believe that the concept itself may be considered under different perspectives. In this work we selected areas with different uses within an urban setting predominance of anthropogenic sound sources and, by electroacoustic system, introduce sound recordings, obtained from natural or rural areas, which have a strong predominance of sound sources of origin not anthropogenic. Through surveys, we assess perception, impressions and feelings that trigger the intrusive sounds naturally occurring in the urban context.

## RESUMEN

Aunque la reciente normativa ISO 12913-1 establece que el paisaje sonoro ha de referirse al ambiente acústico percibido en su contexto, creemos que el concepto en sí puede ser considerado bajo diferentes ópticas. En este trabajo seleccionamos zonas con diferentes usos dentro de un entorno urbano con predominio de fuentes sonoras de origen antropogénico y, mediante un sistema electroacústico, introducimos grabaciones sonoras, obtenidas en entornos naturales o rurales, que presentan un fuerte predominio de fuentes sonoras de origen no antropogénico. Mediante encuestas, evaluamos la percepción, impresiones y sensaciones que provocan los sonidos intrusivos de origen natural en este contexto urbano.

## INTRODUCCIÓN

La reciente norma ISO 12913-1 establece la definición de paisaje sonoro como el entorno acústico tal y como es percibido o experimentado y/o entendido por una persona o personas, en su contexto [1]. Según Pijanowski, el neologismo paisaje sonoro (soundscape) proviene de las palabras inglesas sound (sonido) y landscape (paisaje), basado en la idea de que el sonido es una propiedad perpetua y dinámica de todo paisaje [2].

Y es en esa propiedad dinámica donde basamos el estudio que aquí presentamos. Si consideramos la definición establecida por la norma ISO 12913-1, el paisaje sonoro no sólo cambia por razones objetivas, por ejemplo según el entorno en el que nos encontremos, según la época del año en que se establezca la percepción del entorno o según el momento de día considerado. Dado que en la definición se consideran aspectos subjetivos, el paisaje sonoro no es una propiedad intrínseca de un lugar y un instante temporal, sino que variará según la persona considerada o según el estado de ánimo en el que la persona o personas se encuentren. Y, además, variará según otros elementos, no específicamente sonoros, propios del entorno; como por ejemplo la luminosidad, los olores, etc.

Y, además, ese paisaje sonoro, tan dinámico y tan específico de la persona y del momento considerado, puede ser fácilmente modificado a nuestro antojo, mediante la introducción de sonidos de otros entornos. Últimamente, gracias a las comunicaciones masivas y a la tendencia a incentivar el comercio, en determinados contextos y épocas del año, puede llegar a ser habitual la instalación, en algunos entornos en los que desarrollamos nuestra vida pública, de equipos electroacústicos que, con distintos tipos de música, a veces según la época del año, llegan a generar una nueva estética sonora, y por qué no, una nueva identidad sonora. Pero, además, en la actualidad, tendemos a crear un espacio sonoro privado, que consideramos como propio, dentro de un espacio sonoro público o común. La era tecnológica en la que vivimos ha favorecido este hecho con la inclusión en nuestras vidas de equipos reproductores portátiles con los que aislarnos de la realidad sonora existente a nuestro alrededor.

En la conferencia de apertura del Primer Encuentro Nacional de Ecología Acústica, desarrollado en Argentina en 1994, el que es considerado padre del paisaje sonoro, R.M. Schafer declaró: *"[…] en el futuro, el ambiente deberá diseñarse con una gran sensibilidad, balanceando los sonidos naturales, tecnológicos y humanos, teniendo en cuenta en qué medida los sonidos afectan nuestra conducta y temperamento. El diseño deberá conciliar la estética y la ética*" [3]

Debido a que vivimos principalmente en un entorno urbano, nos relajamos cuando salimos a un entorno natural. Siguiendo la filosofía de R.M. Schafer de crear un ambiente sonoro balanceado, donde se concilien ética y estética, y haciendo uso de las instalaciones electroacústicas de las ciudades, vamos a introducir en un contexto urbano sonidos registrados en entornos naturales y rurales, llevando, de una manera "artificial", el entorno que utilizamos para relajarnos hasta el lugar en el que desarrollamos una parte importante de nuestra vida.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Ciudad bajo estudio

Villanueva de la Serena se ubica al este de la provincia de Badajoz, en la Comunidad Autónoma de Extremadura, cercana a las provincias de Córdoba y Ciudad Real (Figura 1). Es una urbe fundada en el siglo XIII, que actualmente cuenta con una población cercana a los 30.000 habitantes, situándose en el séptimo municipio más poblado de la Comunidad. Muy cercana a la ciudad de Villanueva se encuentra Don Benito, con una población algo superior a los 35.000 habitantes. Ambas ciudades conforman el eje industrial y comercial de las comarcas de La Serena y Vegas Altas. En Villanueva de la Serena confluyen los ríos Ruecas y Gargáligas, afluentes del Guadiana, con este último; lo que hace que la actividad económica esté basada, principalmente, en la agricultura y ganadería, contando con 5 centrales

hortofrutícolas, 3 fábricas de Tomate y 4 industrias arroceras, convirtiéndose en la primera productora de España de arroz, fruta de hueso y tomate.




*Figura 1. Localización de Villanueva de la Serena*

**Selección de los entornos bajo estudio**

El estudio está basado en la zona centro de la ciudad. Se han comparado diversos entornos comerciales según la afluencia de público. Finalmente se ha elegido la calle Ramón y Cajal (Figura 2), conocida como “Los Baldosines” en Villanueva de la Serena. Es una calle peatonal con multitud de negocios (Figuras 3a y 3b), conformándose también como una zona de paso entre el nodo principal de tráfico y un nuevo entorno común y de relajación para los ciudadanos serones: La Plaza de España.

El punto de medida y recogida de datos está situado en la zona central de la calle, ya que aquí es donde está centralizado todo el equipo electroacústico utilizado posteriormente.

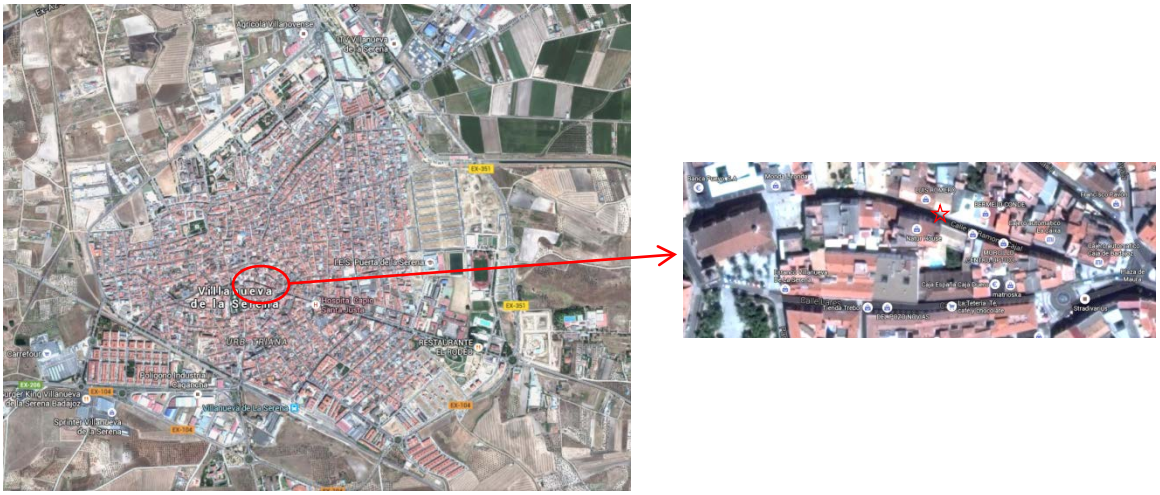



*Figura 2. Localización del entorno bajo estudio. Localización equipo de medida de larga duración.*







*Figuras 3a y 3b. Entorno bajo estudio*

**Medidas y grabaciones**

Para llevar a cabo el estudio, se ha colocado un sonómetro OPERA de 01 dB un mes antes de comenzar a realizar grabaciones y encuestas. De esta forma podemos obtener una referencia suficiente de los valores de los niveles sonoros existentes en esta calle a lo largo de las horas del día y, fundamentalmente, a las horas a las que serán introducidas las grabaciones sonoras. De esta manera podremos controlar el efecto sobre el nivel sonoro que tiene la experiencia realizada. A lo largo de toda la experiencia se ha cuidado que el nivel sonoro de las grabaciones ajenas al entorno que introducimos en él no superase el valor del nivel sonoro propio de la calle. Lo que equivaldría a que el entorno acústico introducido sea, como mucho, equivalente en nivel sonoro al existente y propio del lugar.

La investigación consta de 2 partes bien diferenciadas:

**Evaluación de la percepción del paisaje sonoro sin intrusiones**

En primer término, se han realizado grabaciones binaurales mediante el sistema *NoiseBook* de *Head Acoustics,* con una duración de 100 segundos. Se han realizado diversos registros en el entorno en horario de mañana (10:00 a 14:00) y tarde (18:00 a 22:00). Al mismo tiempo se han llevado a cabo mediciones de 1 minuto mediante el Sonómetro 2250L de B&K y encuestas para evaluar la percepción que los viandantes tienen de los entornos estudiados y de las características de su paisaje sonoro.

**Evaluación de la percepción del paisaje sonoro con intrusiones**

En segundo término, se han introducido grabaciones registradas en entornos naturales, como por ejemplo, el Parque Nacional de Monfragüe [4], y en entornos rurales, como por ejemplo, la localidad cacereña de Alcántara [5].

Para reproducir estos sonidos, se ha utilizado un sistema de altavoces JBL que el Excelentísimo Ayuntamiento de Villanueva instaló para reproducir villancicos durante las Navidades con el fin de incentivar el comercio. Se ha instalado un amplificador de 2 canales y 1000 W de potencia por canal, una mesa de mezclas de 3 canales y un notebook para reproducir los sonidos. Para respetar el descanso de los vecinos de la zona, se ha instalado un temporizador en la toma de corriente del amplificador, evitando reproducir sonidos en horario de mediodía (14:30 a 18:00) y en horario nocturno (21:30 a 10:00).

Las grabaciones binaurales, mediciones y encuestas se han realizado de la misma forma que en la primera parte del estudio.

**Encuestas**

Se han realizado 64 encuestas a las personas que hacían uso del espacio en el momento de las mediciones-grabaciones. El porcentaje de personas dispuestas a colaborar fue algo superior al 60 %. Las personas que no pararon alegaban falta de tiempo o cuestiones de

trabajo. La media de edad de los encuestados es de 43 años, intentando siempre establecer una muestra de la población que cubriera todo el rango de edad y sexo.
Las encuestas se dividen en 2 grupos:

- *Encuesta tipo 1: Evaluación de la percepción del ruido en las calles*

La encuesta para evaluar la percepción del ruido en Villanueva consta de los siguientes apartados: **a) Presentación:** donde se indica el tipo de investigación que se está realizando por la Universidad de Extremadura y se le invita a los transeúntes a colaborar. **b) Instrucciones:** Donde se indica la metodología de la encuesta y la escala utilizada en la misma. **Sección 1)** Evaluación de **aspectos afectivos** respecto de la calle. **Sección 2) Efectos provocados por el ruido.** Perturbación que produce el ruido en los encuestados en situaciones cotidianas en el entorno. **Sección 3) Creencias relacionadas con el ruido**. Evaluación general del conocimiento sobre ruido de los viandantes. **Sección 4) Percepción de ruido y molestia** en la ciudad y en la calle en concreto. **Sección 5) Información objetiva del ruido.** Identificación de fuentes de sonido. **Sección 6) Información sociológica.** Nivel de estudios, sexo, ciudad de procedencia, edad. Finalmente se establecen unos datos de control, tales como día, hora y lugar de realización de la encuesta.

- *Encuesta tipo 2: Evaluación de la percepción del paisaje sonoro en las calles*

La encuesta para evaluar la percepción del paisaje sonoro en Villanueva consta de los siguientes apartados: **a) Presentación:** donde se indica el tipo de investigación que se está realizando por la Universidad de Extremadura y se le invita a los transeúntes a colaborar. **b) Instrucciones:** Donde se indica la metodología de la encuesta y la escala utilizada en la misma. **Sección 1) Percepción del paisaje sonoro.** Impresión general y confort acústico. **Sección 2)** Evaluación de **aspectos afectivos** respecto de la calle. Estudio de diferencias semánticas para valorar el paisaje sonoro del entorno. Molestia generada por el ruido. **Sección 3) Información objetiva del ruido.** Identificación de fuentes de sonido. **Sección 4) Información sociológica.** Nivel de estudios, sexo, ciudad de procedencia, edad. Finalmente se establecen unos datos de control tales como día, hora y lugar de realización de la encuesta.

### Duración

El estudio se ha realizado durante 3 semanas entre Agosto y Septiembre, con el fin de obtener la máxima variabilidad respecto de los usuarios del entorno. De forma alterna, en cada semana, se ha evaluado la percepción del paisaje sonoro sin intrusiones durante 2-3 días, para posteriormente introducir los sonidos elegidos y volver a evaluar la percepción del paisajes sonoro por parte de los viandantes.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Situación acústica del lugar

Presentamos en esta parte del estudio una visión global de la situación acústica de la calle sin intrusiones sonoras y con intrusiones sonoras.

En la tabla 1 tenemos el Nivel Equivalente ponderado A medido in situ, a pie de calle, en los instantes anteriores y posteriores a las encuestas, mediante un sonómetro 2250L de B&K.

*Tabla 1.- Registro de niveles sonoros durante un minuto en el momento de realizar la encuesta*

| Registro 2250L B&K | LAeq (dBA) |
|---|---|
| Semana sonido | 62.90 |
| Semana no sonidos | 61.20 |
| Promedio | 62.13 |

En la tabla 2 presentamos los niveles sonoros registrados por el sonómetro OPERA de 01dB, el cual ha estado colocado en un balcón de la calle registrando niveles durante todo el estudio.

*Tabla 2.- Registro de niveles sonoros durante la duración del estudio*

| Registro OPERA 01dB | Ln (dBA) | Ld (dBA) | Le (dBA) | Lden (dBA) | Lde (dBA) | LAeq24h (dBA) | LAFmax24 h (dBA) | Nº veces LAFmax24h> 90 dBA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Semana sonido | 49.84 | 60.48 | 60.16 | 61.52 | 62.19 | 58.87 | 96.31 | 12.00 |
| Semana no sonidos | 45.37 | 57.73 | 59.34 | 59.37 | 60.51 | 56.54 | 99.77 | 10.00 |
| Promedio | 48.15 | 59.32 | 59.77 | 60.58 | 61.43 | 57.86 | 98.38 | |

Las medidas realizadas con el sonómetro B&K se realizaron en horario diurno. Por tanto, podemos decir que los niveles son muy similares en ambos casos.

**Resultados de la encuesta**

La valoración que hacen los encuestados de su relación con el entorno es, en general, positiva, siendo mayor cuando introducimos los sonidos en el entorno. (Figura 4). Respecto de los aspectos afectivos, destaca de entre todos ellos la calidad del aire, seguido de olores y sonidos del entorno. La desviación mayor se encuentra en la estética y la limpieza del entorno, mientras que la menor es para los sonidos del entorno.

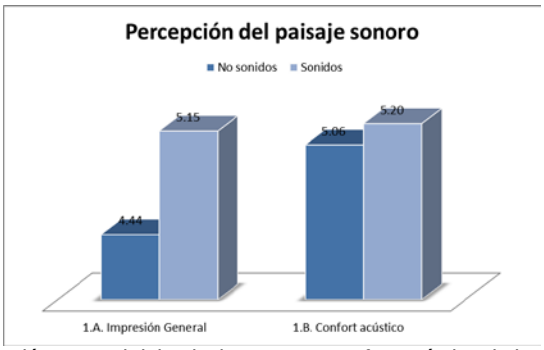



*Figura 4.Impresión general del paisaje sonoro y confort acústico de los encuestados. Escala de 0(nada) a 7 (muchísimo)*

*Tablas 3 y 4.- Aspectos afectivos por parte de los encuestados sin y con intrusión de sonidos. Escala de 0(nada) a 7 (muchísimo)*

| Aspectos afectivos percepción del paisaje sonoro sin intrusión de sonidos | | |
|---|---|---|
| Aspecto afectivo | Promedio | Desviación |
| Limpieza | 3.87 | 1.74 |
| Calidad del aire | 5.47 | 1.04 |
| Sonidos del entorno | 4.83 | 0.91 |
| Olores | 4.93 | 1.31 |
| Estética del entorno | 4.03 | 2.03 |

| Aspectos afectivos percepción del paisaje sonoro con intrusión de sonidos | | |
|---|---|---|
| Aspecto afectivo | Promedio | Desviación |
| Limpieza | 4.91 | 1.52 |
| Calidad del aire | 5.79 | 1.15 |
| Sonidos del entorno | 5.35 | 1.07 |
| Olores | 5.44 | 1.31 |
| Estética del entorno | 4.44 | 1.69 |

Cuando introducimos los sonidos en el entorno en cuestión, los transeúntes valoran de forma algo más favorable los aspectos afectivos, subiendo, por ejemplo, la evaluación de los sonidos en algo más de medio punto, o la limpieza en algo más de 1 punto. Queda fuera del esta investigación evaluar la posible relación existente entre aspectos sociológicos, como edad, sexo o nivel de estudios, y aspectos afectivos.

Respecto del estudio de diferencias semánticas (figuras 5 y 6), los viandantes consideran el paisaje sonoro más interesante, natural e inesperado cuando se reproducen los sonidos

elegidos en la calle que cuando no. Respecto del nivel de agrado o relajación apenas hay diferencias entre ambas situaciones.

Llama la atención en este estudio la evaluación de la pareja de adjetivos interesante-aburrido. Cuando una zona principalmente comercial no tiene la actividad que debería, los encuestados tienden a definir la zona, siempre respecto del paisaje sonoro, como aburrida, puesto que no oyen la algarabía que debería haber en un entorno de esas características [6].
No obstante, parece que la gente que hace uso de la calle considera que el paisaje sonoro es más armónico cuando los sonidos se están reproduciendo que cuando no.

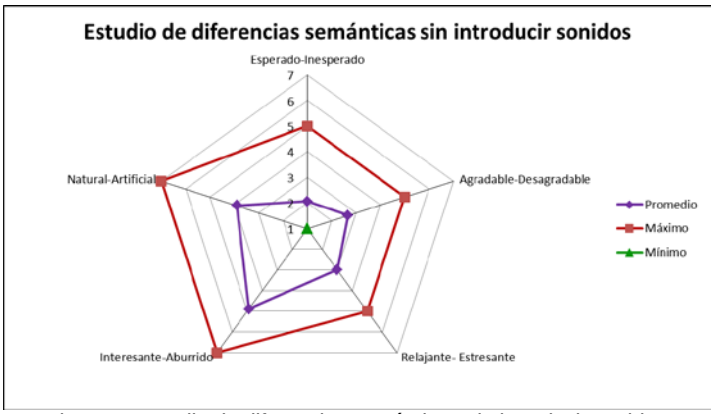
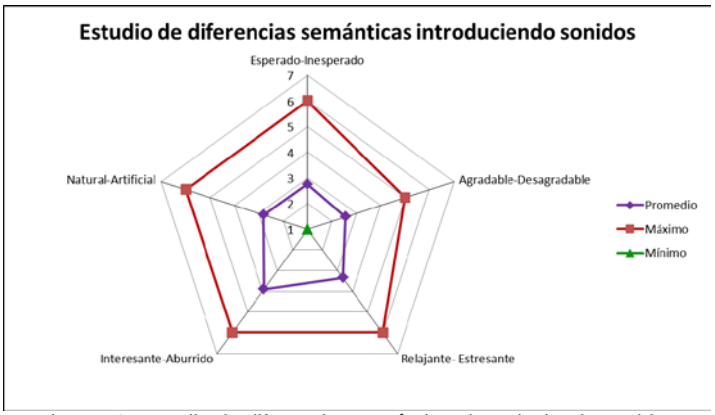



*Figura 5. Estudio de diferencias semánticas sin introducir sonidos.*




*Figuras 6. Estudio de diferencias semánticas introduciendo sonidos.*

## CONCLUSIONES

Realizar un estudio de percepción de paisaje sonoro en una ciudad pequeña puede ser más complicado de lo que a priori pensamos. Varios son los motivos:

1) La respuesta puede estar muy politizada. La zona comercial de una ciudad pequeña es, valga la redundancia, pequeña. En estas urbes, en las que todo el mundo se conoce, es fácil alabar o criticar una actuación de los que mandan cuando preguntamos por aspectos afectivos, tales como la estética del entorno o la limpieza, dependientes de ellos. Algunas de las encuestas se han tenido que desechar por este motivo.

   Y como todos nos conocemos, algunas encuestas se han realizado por compromiso con el encuestador, lo que, a veces, puede afectar al cuidado que se tenga a la hora de pensar la respuesta. Incluso, a veces, con respuestas del tipo, "*pon lo que quieras*". Naturalmente, en estos casos las encuestas han sido desechadas.

Los encuestados evalúan de igual manera el ruido en la calle cuando están presentes los sonidos ajenos que cuando están ausentes. Parece que, cuando en las encuestas (encuesta tipo 1) introducimos la palabra ruido (entendido como sonido no deseado), los encuestados tienden a centrar su respuesta en ese concepto y en tipos de sonidos asociados, obviando los sonidos introducidos.

No sucede lo mismo cuando al principio de la encuesta se les indica que lo que van a evaluar es el paisaje sonoro del entorno (encuesta tipo 2), entendido como el conjunto de sonidos del mismo. En este caso, parece que los transeúntes evalúan más concienzudamente respecto de los sonidos en general, y no del ruido en particular.

Introduciendo sonidos a través de un sistema electroacústico de un entorno distinto (en este caso natural) en una zona urbana y comercial, se ha detectado una modificación de la percepción del ambiente sonoro por los usuarios de la zona, reconociendo éstos nuevas marcas sonoras en el entorno y priorizándolas sobre los sonidos que habitualmente escuchan, evaluando de forma positiva los sonidos de un contexto diferente.

## AGRADECIMIENTOS

Excelentísimo Ayuntamiento de Villanueva de la Serena (Badajoz)

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
Una manera de hacer Europa

GOBIERNO DE EXTREMADURA
Consejería de Empleo, Empresa e Innovación

GOBIERNO DE EXTREMADURA

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ISO 12913, Acoustics- Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework.

[2] Pijanowski, B. C., L. J. Villanueva-Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napoletano, S. H. Gage, and N. Pieretti. 2011. Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. Bioscience 61 (3): 203-16.

[3] Espinosa, S. Ecología acústica y educación. Bases para el diseño de un nuevo paisaje sonoro. 2006. Monografías de educación ambiental. Editorial Graó.

[4] Juan Miguel Barrigón Morillas, Pedro Atanasio Moraga, Leonor Retortillo Osuna, David Montes González, Valentín Gómez Escobar, Rosendo Vílchez-Gómez, Juan Antonio Méndez Sierra, Guillermo Rey Gozalo, Carlos Prieto Gajardo; Rubén Maderuelo Sanz; Manuel Martín Castizo, José Trujillo Carmona, Javier Carmona del Río. Caracterización del paisaje sonoro natural. El Parque Nacional de Monfragüe. Tecniacustica, 2013. Valladolid.

[5] Juan Miguel Barrigón Morillas, David Montes González, Ángel Merchán Álvarez, Pedro Atanasio Moraga, Valentín Gómez Escobar, Rosendo Vílchez-Gómez, Juan Antonio Méndez Sierra, Guillermo Rey Gozalo, Carlos Prieto Gajardo, Rubén Maderuelo Sanz, Manuel Martín Castizo, José Trujillo Carmona, Javier Carmona del Río. Caracterización del paisaje sonoro rural. Alcántara, un pueblo de la raya extremeña. Tecniacustica, 2013. Valladolid.

[6] Fernández-González, María; Barrigón-Morillas, Juan M.; Atanasio-Moraga, Pedro; Montes-González, David; Rey-Gozalo, Guillermo; Gómez-Escobar, Valentín; Vílchez-Gómez, Rosendo; Méndez-Sierra, Juan A.; Prieto-Gajardo, Carlos. Caracterización del paisaje sonoro rural en la Comarca del Campo Arañuelo. Tecniacústica, 2014. Murcia.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ESTUDIO DE PAISAJE SONORO EN VALDIVIA, CHILE.

PACS: 43.50.Qp

Suárez Silva, Enrique; Cárdenas Mansilla, Jorge
Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Miraflores, Valdivia, Chile.
Tel. +56 63 2221339
E-mail: enriquesuarez@uach.cl; jcardenas@uach.cl

## ABSTRACT

A study of the soundscape was carried out in the city of Valdivia. The aim of this study was to define the most important aspects of sound for the city's neighbors, and the sound assessment of both places and events. A survey was carried out, and further information in the field that included binaural sound recordings was obtained. The study was conducted to supplement the information obtained from measurements and modeling of the city's noise map. This study is a contribution to define a comprehensive overview of the sound environment, and to guide further lines of work in the field.

## RESUMEN

Se lleva a cabo un estudio del paisaje sonoro en la ciudad de Valdivia, con la intención de definir los aspectos sonoros más relevantes para los habitantes de la ciudad y la valorización sonora de lugares y eventos. Se realizó una encuesta y se levantó información en terreno que contemplaron grabaciones sonoras binaurales. El estudio se orientó a complementar la información obtenida a partir de las mediciones y modelaciones del mapa de ruido realizado en la ciudad, con la idea de obtener una visión más completa del ambiente sonoro, y de orientar mejor futuras líneas de trabajo en la materia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los paisajes sonoros definen el entorno que nos rodea permanentemente, y afectan el bienestar y calidad de vida. Pueden ser evaluados en términos positivos; como el sonido del mar; el de un entorno por el cual fluye un río o el sonido de la lluvia. Por el contrario, un paisaje sonoro negativo sería convivir en un entorno con niveles de ruido perjudiciales para la salud física y mental, donde el sonido constituye un elemento de desorden, desagrado y molestia.

## 2. MARCO TEÓRICO

La literatura disponible sobre Soundscapes (Paisajes Sonoros), expone un tema altamente multidisciplinar que envuelve muchas ideas, conceptos, objetivos y métodos distintos. De hecho, la definición del término Paisaje Sonoro ha sido habitualmente algo confusa. A menudo se considera una adaptación del término visual "paisaje" (Schafer, 1994 - originalmente publicado 1977), que cambia el foco desde lo visual al entorno sonoro.

La nueva norma ISO 12913-1:2014 define el paisaje sonoro como "ambiente acústico tal como es percibido o experimentado y/o entendido por una persona o personas, en su contexto". Esto establece: primero, que se trata del sonido de un entorno o ambiente, y lo segundo (y más complejo), que ese sonido está vinculado con la percepción de una persona.

### 2.1. Modelos de paisajes sonoros

Para la descripción y evaluación de paisajes sonoros se han desarrollado diversos modelos, en los que habitualmente están presentes el individuo y los factores físicos que lo rodean, por ejemplo:

- Kull distingue en los paisajes sonoros sonidos naturales (no antropogénico: el clima, los animales, el mar, la vegetación y el terreno) y artificiales (fuentes antropogénicas: fuentes móviles, fuentes fijas, estructuras y materiales).
- Job indica que el paisaje sonoro debe incorporar variables medioambientales, socioculturales y psicológicas (contaminación atmosférica y actitud del/los individuos).
- Cain define que el aspecto "sonoro" puede ser medido psicoacústicamente, en tanto "el paisaje" corresponde a la relación entre diversas fuentes que pueden cambiar constantemente y ser percibidas por un individuo. De esta manera los paisajes sonoros son considerados positivos dependiendo de la actividad y ubicación individual.

En síntesis, diversos investigadores separan el concepto de paisaje sonoro en secciones que permiten identificar aspectos que consideran importantes para comprenderlo.

### 2.2. Acercamientos metodológicos

En los ambientes urbanos, la investigación del paisaje sonoro está a menudo enfocada hacia las carreteras y el tráfico aéreo, y por tanto en las áreas residenciales se evalúa en relación a la molestia del ruido, mientras que en los espacios públicos, incluyendo parques urbanos y plazas son a menudo discutidos en ambos términos, positivos y negativos. El énfasis de algunas investigaciones, tanto en áreas urbanas como rurales, ha sido el estudio de "zonas tranquilas" lo que ha llevado a sugerir incorporar el término "áreas de alta calidad acústica".

### 2.3. Terminología utilizada en paisaje sonoro

Existe poco acuerdo sobre la terminología utilizada para describir los sonidos y paisajes sonoros entre diferentes disciplinas y profesiones lo cual sugiere que los sonidos no se conceptualizan como efectos acústicos abstractos sin contexto.

Algunos términos señalados por Schafer para el estudio de paisajes sonoros son:

- Keynote: El sonido que se escucha continuamente o con frecuencia.
- Señales Sonoras: Sonidos que atraen la atención, contrastando así con los keynotes.
- Soundmark: Aquel sonido de importancia para la comunidad y/o con cualidades únicas.
- Lo- fi: "Baja Fidelidad" es una "señal con deficiente relación señal a ruido". En el paisaje sonoro hay numerosas señales que compiten para ser escuchadas, enmascarándose.
- High-fi: "Alta Fidelidad" es una "señal con favorable relación señal a ruido". Los sonidos pueden ser distinguidos claramente ya que hay poco enmascaramiento.

### 2.4. Norma ISO

La Norma Internacional ISO 12913-1:2014 es el primer paso por buscar un consenso en la definición de "paisaje sonoro". En ella se describe el proceso de percibir o experimentar y / o entender un ambiente acústico, destacando siete conceptos generales y sus relaciones: (1) contexto, (2) fuentes sonoras, (3) entorno acústico, (4) sensación auditiva, (5) interpretación de la sensación auditiva, (6) respuestas, y (7) resultados.

### 2.5. Paisajes sonoros y calidad ambiental

La investigación indica que las zonas tranquilas y paisajes sonoros confortables pueden beneficiar la salud mental. El proyecto “Paisaje sonoro de las ciudades y paisajes europeos” (Proyecto COST) es una figura intergubernamental para la Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología, lo que permite la coordinación de financiamiento de investigación a nivel nacional en el ámbito europeo. Esta red está integrada por 21 países de la Comunidad Europea, junto con Australia y Nueva Zelanda. Su principal objetivo es reforzar la ciencia que sustenta la investigación en Paisaje Sonoro y promover que el campo de estudio vaya mucho más allá de su estado actual, coordinando esfuerzos internacionales e interdisciplinarios. Esta acción potenciará al paisaje sonoro en legislaciones, políticas y prácticas destinadas a preservar y/o mejorar el medio ambiente sonoro.

### 2.6. Paisaje sonoro en América Latina

En América Latina el entorno acústico urbano presenta diferencias relevantes respecto de las ciudades de países más desarrollados. Así mismo, existen diferencias entre los países de la región que se manifiestan tanto en los hábitos de la población en torno al ruido, en las propiedades físicas de las fuentes sonoras (que presentan diferentes contenidos energéticos, espectrales y temporal en sus emisiones), como en los sonidos característicos de cada cultura, que también son únicos, razones suficientes para el estudio y análisis de sus paisajes sonoros.

## 3. METODOLOGÍA

Se definieron tres tipos de criterios para realizar este primer trabajo de Paisajes Sonoros de Valdivia, vinculados con un mapa de ruido:

1. Áreas verdes más visitadas (Encuesta)
2. Ambientes sonoros considerados característicos (Encuesta).
3. Tipos de vías en que fueron clasificadas las calles de Valdivia (Mapa de Ruido).

El primer criterio se basó en estudios previos que revelaron la importancia de las áreas verdes en la ciudad de Valdivia. El segundo criterio atiende la necesidad de comprender cuál es la percepción de los ciudadanos y sus preferencias respecto del ambiente sonoro, además de identificar sonidos que pueden ser de interés desde el punto de vista ambiental, cultural, patrimonial o social en la ciudad. El tercer criterio se relaciona con un aspecto metodológico fundamental utilizado para la elaboración del mapa de ruido de la ciudad, objetivo principal del proyecto marco donde se incluyó este estudio, y que pretende mostrar los diferentes paisajes sonoros que están asociados a las distintas clasificaciones de las vías utilizadas para modelar la ciudad de Valdivia.

La encuesta considerada en el proyecto consistió en un cuestionario en línea (plataforma www.encuestafacil.com) con un total de 846 encuestas válidamente recibidas y analizadas. Se consultó la sensibilidad al ruido ambiental, fuentes de ruido ambiental, de impacto del ruido ambiental en sus actividades y salud, su opinión sobre las áreas verdes y el paisaje sonoro de la ciudad y evaluación de las políticas públicas. La muestra se configuró principalmente con personas con estudios medios (48,5%), trabajan fuera de casa (36,4%), en el rango de edades

comprendido entre 18 y 24 años (51,7%). El porcentaje de mujeres en la muestra que alcanza al 48,8%, donde fue posible observar que el 29,9% de las personas entrevistadas reside más de 10 años en su vivienda y un 45,9% vive hace más de 10 años en la ciudad de Valdivia.

### 3.1. Áreas verdes más visitadas

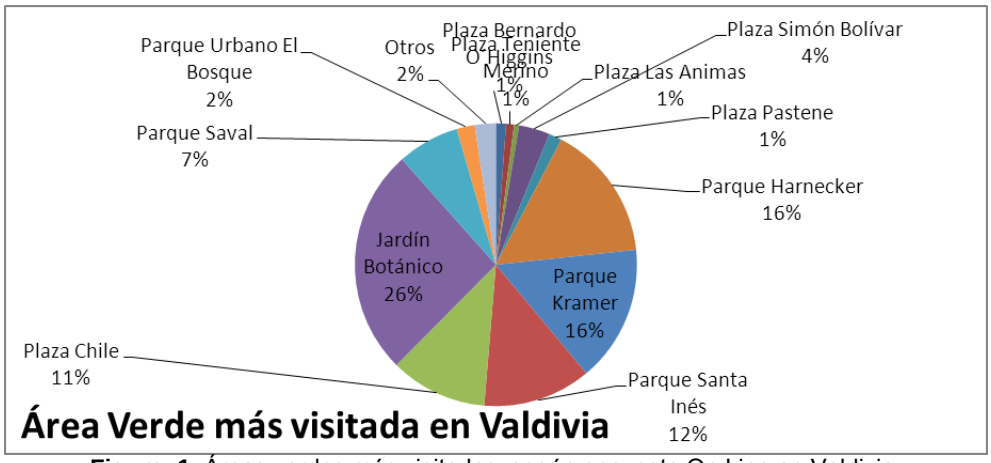



**Figura. 1**. Áreas verdes más visitadas, según encuesta On Line en Valdivia.

### 3.2. Ambientes sonoros característicos

Se incluyó una pregunta en la encuesta de acústica ambiental a residentes de Valdivia, que ofrece una lista de ambientes sonoros validada por un panel de expertos en un trabajo preliminar. Estos ambientes sonoros fueron jerarquizados según el número de respuestas, sumando las columnas de respuesta “muy característico” y “absolutamente característico”.

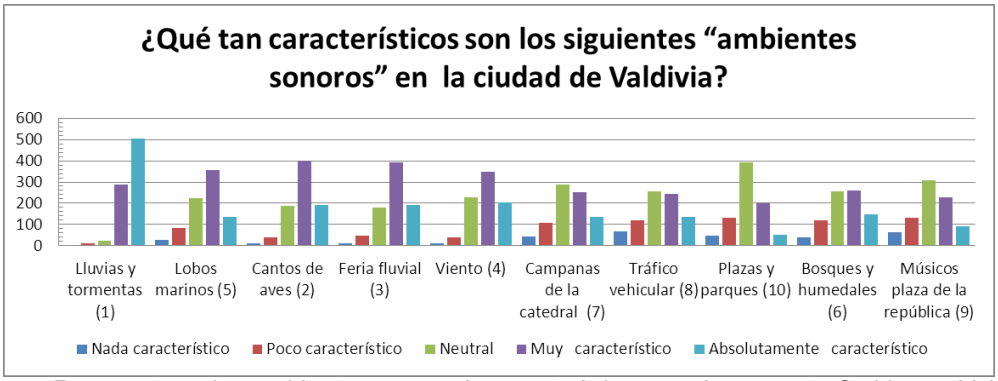



**Figura 2**. Respuestas sobre ambiente sonoro más característicos, según encuesta On Line en Valdivia.

### 3.3. Tipos de vías en Valdivia

Para realizar el mapa de ruido de tránsito de la ciudad de Valdivia, las calles fueron clasificadas en 6 categorías según definición del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Incluye una subclasificación que diferencia vías “con” y “sin” locomoción colectiva (buses y microbuses):

1. Calle local sin locomoción colectiva (LS)
2. Calle local con locomoción colectiva (LC)
3. Calle de servicio sin locomoción colectiva (SS)
4. Calle de servicio con locomoción colectiva (SC)
5. Calle colectora sin locomoción colectiva (CS)
6. Calle colectora con locomoción colectiva (CC)

### 3.4. Proceso de grabación de los paisajes sonoros de Valdivia

Las grabaciones fueron realizadas entre Octubre de 2014 y Marzo de 2015. Todos los registros sonoros se realizaron en calidad profesional; frecuencia de muestreo de 96 kHz en 24 bits.

Se utilizó la técnica de grabación binaural, que consiste en ubicar una cabeza artificial en el lugar de grabación. De esta manera, si la reproducción se realiza a través de audífonos, el auditor recibe una completa impresión del espacio acústico en forma idéntica a la que él tendría si mantuviera su cabeza en la misma ubicación de la cabeza artificial.

Las grabaciones de audio de los paisajes sonoros se complementaron con la medición de parámetros acústicos tales como el Leq, espectro en 1/3 de octava, entre otros. A sí mismo se midieron; coordenadas UTM, temperatura, humedad y velocidad del viento. El equipamiento utilizado fue: Dummy Head Neumann, modelo KU 100, Grabador Soundevices 788T, Sonómetro tipo I marca Cirrus modelo CR 171B , GPS Garmin etrex, Termoanemómetro Extech.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Paisajes sonoros registrados

Según los resultados de las encuestas, se seleccionaron 18 paisajes sonoros para registrar:

- 6 áreas verdes más visitadas: Jardín Botánico, Parque Harnecker, Parque Krammer, Parque Santa Inés, Plaza Chile y Parque Saval.
- 6 ambientes característicos: lluvias y tormentas, cantos de aves, la Feria Fluvial, sonido del viento, lobos marinos, bosques y humedales, campanas de la Catedral.
- 6 tipos de calles: LS, LC, SS, SC, CS, CC

De estos 18 paisajes sonoros, finalmente se grabaron 16. Las grabaciones de lluvias y tormentas, cantos de aves y sonido del viento no se incluyeron en este estudio, por presentar muchas alternativas de registro, que demandan un estudio más detallado para cada uno de ellos. Los horarios de las grabaciones corresponden al que habitualmente pueden ser visitados los lugares escogidos. Por ejemplo, si bien un parque o un humedal poseen una dinámica propia de día, la noche, y a diferentes horas (amanecer y atardecer, por ejemplo), se escogió un horario en el cual sea más probable una visita de los vecinos.

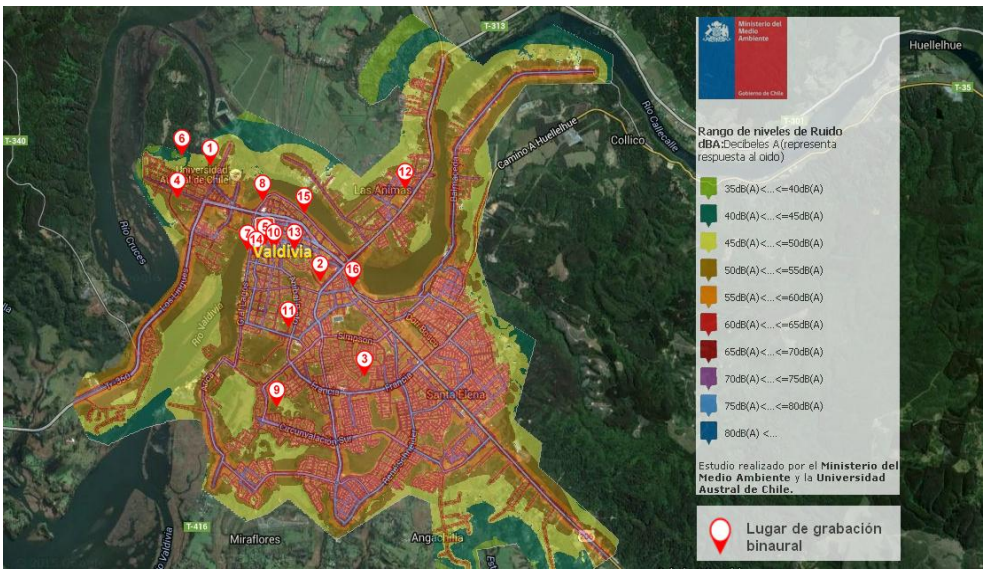
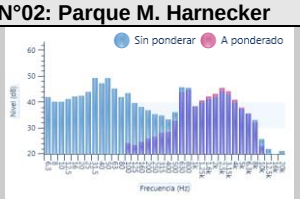
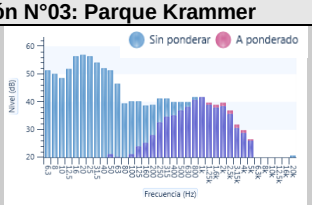
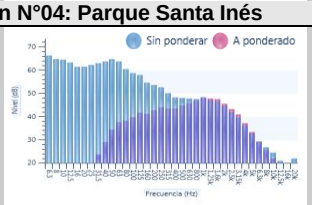
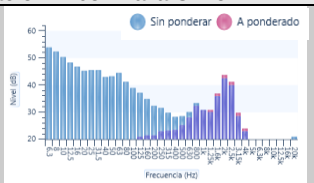
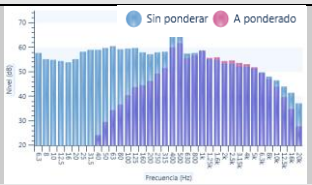
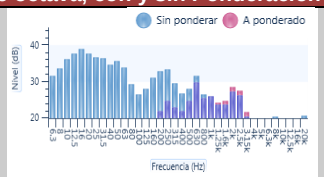
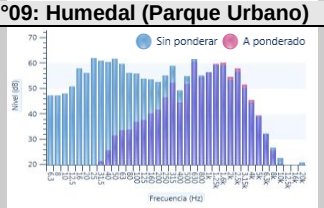
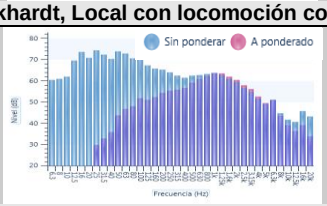
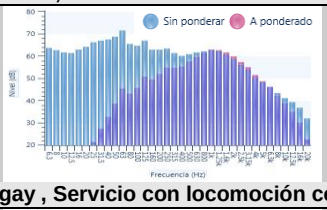
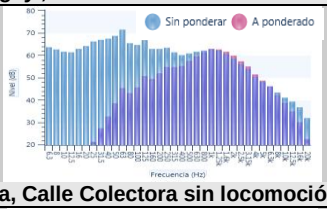
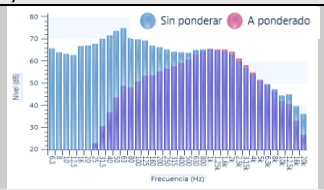



**Figura 3** Distribución espacial de los paisajes sonoros grabados en Valdivia.

**Tabla 1** Resumen del registro de los paisajes sonoros en Valdivia.

| Fotografía del lugar de grabación | Espectro de frecuencias. Bandas 1/3 de octava, con y sin Ponderación A | Índices Acústicos | Coordenadas UTM |
|---|---|---|---|
|  |  | Leq 47,8 [dBA]<br>L90 43,6 [dBA] | 18H 649784 5592582 |
| **Grabación N°01: Jardín Botánico UACh** | | | |
|  |  | Leq 51,0 [dBA]<br>L90 46,1 [dBA] | 18H 651047 5590690 |
| **Grabación N°02: Parque M. Harnecker** | | | |
|  |  | Leq 52,8 [dBA]<br>L90 43,1 [dBA] | 18H 651616 5589194 |
| **Grabación N°03: Parque Krammer** | | | |
|  |  | Leq 49,0 [dBA]<br>L90 45,6 [dBA] | 18H 649286 5591750 |
| **Grabación N°04: Parque Santa Inés** | | | |
|  |  | Leq 57,1 [dBA]<br>L90 54,8 [dBA] | 18H 650062 5591582 |
| **Grabación N°05: Plaza Chile** | | | |
|  |  | Leq 46,7 [dBA]<br>L90 43,2 [dBA] | 18H 649081 5592906 |
| **Grabación N°06: Parque Municipal Saval** | | | |
|  |  | Leq 72,0 [dBA]<br>L90 68,2 [dBA] | 18H 649935 5591552 |
| **Grabación N°07: Mercado Fluvial** | | | |
|  |  | Leq 68,0 [dBA]<br>L90 57,4 [dBA] | 18H 650075 5591844 |
| **Grabación N°08: Av. Costanera Lobos Marinos** | | | |

| Fotografía del lugar de grabación | Espectro de frecuencias. Bandas 1/3 de octava, con y sin Ponderación A | Índices Acústicos | Coordenadas UTM |
|---|---|---|---|
|  |  | Leq 37,0 [dBA]<br>L90 34,4 [dBA] | 18H 650333 5588524 |
| **Grabación N°09: Humedal (Parque Urbano)** | | | |
|  |  | Leq 67,1 [dBA]<br>L90 50,9 [dBA] | 18H 650140 5591401 |
| **Grabación N°10: Campanas Catedral** | | | |
|  |  | Leq 63,8 [dBA]<br>L90 42,3 [dBA] | 18H 650484 5589767 |
| **Grabación N°11: Calle Rudlof, Local sin locomoción colectiva (LS)** | | | |
|  |  | Leq 58,7 [dBA]<br>L90 40,6 [dBA] | 18H 652220 5591604 |
| **Grabación N°12: Calle Eckhardt, Local con locomoción colectiva (LC)** | | | |
|  |  | Leq 66,5 [dBA]<br>L90 45,7 [dBA] | 18H 650767 5590969 |
| **Grabación N°13: Calle Beaucheff, Servicio sin locomoción colectiva (SS)** | | | |
|  |  | Leq 71,5 [dBA]<br>L90 62,3 [dBA] | 18H 649964 5591293 |
| **Grabación N°14: Calle Yungay , Servicio con locomoción colectiva (SC)** | | | |
|  |  | Leq 70,6 [dBA]<br>L90 57,3 [dBA] | 18H 650712 5591710 |
| **Grabación N°15: Av. Costanera, Calle Colectora sin locomoción colectiva (CS)** | | | |
|  |  | Leq 73,7 [dBA]<br>L90 62,1 [dBA] | 18H 651527 5590537 |
| **Grabación N°16: Av. Picarte, Calle Colectora con locomoción colectiva (CC)** | | | |

### 4.2. CD de Paisajes Sonoros

Con el registro de grabaciones binaurales se elaboró un primer CD Audio "Paisajes Sonoros de Valdivia 2015", de duración: 01:07:00. Para cada paisaje sonoro, se incluye una pista de muestra (15 segundos) y la pista completa para una escucha con detalle de cada paisaje.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha comprobado:

- La relevancia del entorno sonoro como factor ambiental, no sólo como fenómeno físico medible, sino que como un elemento que debe ser también valorado subjetivamente.
- La necesidad de incorporar estos conceptos en el cuidado del medio ambiente acústico, como una forma de colaborar en una mejor calidad de vida.
- El trabajo en paisajes sonoros es una línea de estudio nueva, que se encuentra a nivel mundial, en pleno desarrollo como elemento ambientalmente relevante.
- Es posible estudiar y trabajar en el registro y valoración de paisajes sonoros que la ciudadanía puede y reconoce, con facilidad.

El análisis de los parámetros acústicos, la percepción de las personas y el vínculo con el mapa de ruido, son aspectos en los que el grupo de investigación está trabajando actualmente.

## 6. AGRADECIMIENT0S

Este estudio fue realizado gracias al proyecto "Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de Tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación" (2015), ejecutado por el Instituto de Acústica de la Universidad Austral, y financiado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. ID: 608897-50-LP13.

## 7. REFERENCIAS

1. Cain, R.,Jennings, P., Adams, M., Bruce, N., Carlyle, A., Cusack, P., Davies, W., Hume., K. & Plack, C. (2008). An activity-centric conceptual framework for assessing and creating positive urban soundscapes. Proceedings of the Institute of Acoustics, 30(2),546-551.
2. MEMORANDUM OF UNDERSTANDING For the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action TD0804 Soundscape of European Cities and Landscapes.
3. EEA (2014). European Environmental Agency. Good practice guide on quiet areas. EAA Technical report, N.º 04/2014 (2014).
4. EEA (2014). European Environmental Agency. Noise in Europe 2014. EAA Technical report, N.º 10/2014 (2014).
5. González, Isaac (2012), Estudio del Patrimonio Sonoro de la ciudad de Valdivia en el siglo XXI. Trabajo de ACUS 183- Proyecto en Acústica Ambiental, Ingeniería Civil Acústica, Universidad Austral de Chile.
6. Ipsen, D. (2002). The urban nightingale or some theoretical considerations about sound and noise. In H.Jelmi (Eds.) Soundscape studies and methods. Helsinki: Finnish Society for Ethnomusicology, (pp S185-197). Finnish study for ethnomusicology piblication, 9.
7. Job, R.F.S., Hatfield, J. Carter, N.L., Peploe, P., Taylor, R. & Morrell, S. (1999). Reaction to noise: the roles of soundscapes and psychscape. Paper presented at Inter-Noise, in Fort Lauderdale, Florida, USA, 6th-8th December.
8. ISO 12913-1:2014: Acoustics - Soundscape - Part 1: Definition and conceptual framework.
9. Kang J., et al.; "Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces"; Building and Environment, Volume 45, Issue 1, January 2010, Pages 150-157
10. Kull,R.C. (2006) Natural and urban soundscapes: The need for a multi-disciplinary approach. Acta Acustica united with Acustica, 92(6),898-902.
11. Ministerio del Medio Ambiente (2015) Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de Tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación. Informe Final. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile. ID: Nº 608897-50-LP13
12. Sarah R. Payne, William J. Davies, Mags D. Adams (2009) Research into the Practical and Policy Applications of Soundscape Concepts and Techniques in Urban Areas (NANR 200). Univ. of Salford.
13. Schafer, R. Murray (1994). The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. Vermont: Destinity Books.
14. Suárez, E. (2002). *Metodologías Simplificadas para Estudios en Acústica Ambiental, Aplicación en la Isla de Menorca*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# VALORIZACIÓN ACÚSTICA DE ESPACIOS VERDES EN VALDIVIA, CHILE.

PACS: 43.50.Qp / 43.50.Rq

Suárez Silva, Enrique[1]; Barbosa Prieto, Olga[2]
[1] Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Miraflores, Valdivia, Chile
Tel. +56 63 2221339
E-mail: enriquesuarez@uach.cl

[2] Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias
Universidad Austral de Chile (UACh)
Campus Isla Teja, Valdivia, Chile
Tel. +56 63 2221217
E-mail: olga.barbosa@uach.cl

## ABSTRACT

A study of acoustic assessment has been carried out about green areas in Valdivia city. The objective of this study is to obtain data to guide recommendations on environmental management in Valdivia, where there are a high percentage of green areas per inhabitant. This study was aimed to complement the information obtained from measurements and modeling of the corresponding city's noise map. Nine places and parks of the city were analyzed supported by a survey applied to the population.

## RESUMEN

Se lleva a cabo una evaluación acústica de áreas verdes en la ciudad de Valdivia. El objetivo es obtener datos que permitan orientar recomendaciones en gestión ambiental en la ciudad de Valdivia, donde existe un elevado porcentaje de áreas verdes por habitante. Este estudio se orientó a complementar la información obtenida a partir de las mediciones y modelaciones del mapa de ruido realizado en la ciudad. Se analizaron nueve plazas y parques de la ciudad, mediante una encuesta a la población.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas. Este fenómeno ha generado que áreas del conocimiento tradicionalmente alejadas de la planificación urbana, se hayan interesado por la investigación en varios ámbitos de planificación urbana. Una de estas áreas del conocimiento es la Ecología, que usualmente se le asocia a procesos que ocurren en áreas con amplias superficies cubiertas por vegetación y donde la naturaleza es el principal elemento. Sin embargo, a mediados del siglo XX los ecólogos comienzan a hacer ecología en la ciudad, principalmente situando la flora y fauna de áreas verdes, para con el tiempo ir migrando a investigar la ecología de la ciudad. Esto ha permitió abordar aspectos más complejos como lo son la interacción de las áreas verdes con la sociedad y su rol en la provisión de servicios ecosistémicos.

Este proceso si bien ha sido ventajoso, ha sido poco integrador y solo recientemente ha demandado una visión multidisciplinaria, y que corresponde a la que está guiando la planificación de algunas las ciudades. Sin embargo, gran parte de estos avances se han realizados en ciudades de países desarrollados, dejando aún por ver si los modelos que hoy se aplican, por ejemplo en ciudades de Latina América, son o no los más adecuados. Esto último cobra aún más relevancia cuando se toma en cuenta que Latino América es la región más urbanizada del mundo, con un 80% de su población viviendo en ciudades y con una proyección para el 2050 de un 90%. Chile es el tercer país más urbanizado de Sud América, con un 99.5% de su población viviendo en ciudades.

Dentro de las áreas urbanas, los espacios verdes han sido destacados desde la Ecología Urbana, por ser claves en la provisión de hábitat para la biodiversidad y de servicios ecosistémicos a la población. Desde hace unos años han sido ampliamente considerados por su rol en la generación de efectos positivos en el bienestar físico y mental.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Multifuncionalidad de áreas verdes e importancia del paisaje acústico

Si bien las áreas verdes son diseñadas principalmente para proveer de recreación a la población urbana, éstas cumplen múltiples funciones. Por ejemplo, dependiendo del tamaño y el tipo de cobertura, un área verde intercepta e infiltra una gran cantidad de agua luego de una lluvia, captura carbono tanto en su biomas aérea (vegetación) como subterránea (suelos y raíces), alberga una cantidad variable de flora y fauna, al mismo tiempo de proveer de un espacio de recreación y encuentro a la comunidad (funciones servicios ecosistémicos).

Sin embargo las áreas verdes, pueden diferir en sus características y por esto variar en diverso grado la provisión de estos servicios. Por otro lado, estas características pueden influir en la frecuencia de visita, uso y valoración por parte de la población urbana. Por ejemplo, la calidad de estos espacios es el principal determinante de uso de áreas verdes, y ha sido demostrado que, por ejemplo, el diseño y composición de elementos de éstos, inciden en la percepción de seguridad y por esto la valoración y frecuencia de visitas. Signos de falta de mantención (ie. vandalismo y basura) también son asociados a falta de seguridad resultando un perjuicio a la valoración de estos espacios.

El ambiente acústico es otro determinante de la valoración de un área verde. La influencia del sonido en los espacios públicos se puede cuantificar con parámetros o descriptores acústicos, los cuales son objetivos y medibles. Estos se refieren a fuentes de ruido ambiental (como el tránsito vehicular), que están relacionadas también con la ubicación de las áreas verdes. Como es de suponer, tiene especial relevancia la opinión que tienen las personas que utilizan estos espacios, quienes son los que pueden valorar estos lugares bajo otros parámetros subjetivos, pues varían de persona a persona.

Por ejemplo, un estudio realizado en la ciudad de Alcalá de Henares, muestra que plazas periféricas poseen problemas de inseguridad y degradación urbana, sin embargo la presencia visual y sonora de elementos naturales como agua, vegetación y aves acuáticas, y la poca presencia de fuentes de ruido, como en tránsito vehicular, incrementan significativamente su valoración por parte de la comunidad. Otro un estudio realizado en la ciudad de Sheffield Inglaterra, muestra una marcada preferencia a valorizar un mayor número de elementos del paisaje sonoro, y siempre haciendo énfasis positivo en elementos naturales.

Debido a que éstos y otros estudios han reportado una relación directa entre la valoración acústica subjetiva y los niveles sonoros objetivos de los espacios verdes en diversas ciudades, se ha llegado a recomendar que en caso de espacios verdes afectados por ruido, la presencia de factores o elementos naturales como vegetación, aves y flujos de agua, harán que mejore la percepción de los usuarios hacia estas áreas.

En Chile, si bien se han realizado estudios para determinar tanto los niveles de ruidos como la percepción sobre estos, no existen estudios sobre la función que tiene las áreas verdes sobre la percepción de ruido, y de cómo el ambiente acústico aporta a la valoración de un área verde por parte de sus visitantes.

### 2.2. Valdivia como estudio piloto

En ausencia de un claro lineamiento sobre el mejoramiento de la calidad de áreas verdes respecto a su realidad acústica, se justifica indagar en esta condición particular de las áreas más usadas por la población de Valdivia, e iniciar una línea de trabajo en este tema.

Valdivia es una ciudad intermedia, con una población de 166.000 habitantes. Tomando en cuenta la existencia de algunos estudios previos (FONDECYT 11110183) que permitieron la digitalización y evaluación de elementos de la ciudad, es que se tomó Valdivia como caso de estudio para investigar la valoración de las áreas verdes en el contexto del paisaje acústico.

Estudios preliminares dan cuenta de una gran disponibilidad de áreas verdes, alcanzando valores que bordean los 10 $m^2$ por habitante. En este contexto es especialmente relevante en Valdivia comprender la valoración que se le da a estos espacios, pues si bien los rangos de acceso son los sugeridos por la OMS, la calidad de estas áreas varía de un barrio a otro.

## 3. METODOLOGÍA

En el presente análisis se ha tenido como base, estudios previos del equipo investigador. En este sentido, se definió como área verde a todas zonas potencialmente verdes con acceso público y un ancho >10 metros, para excluir pequeños antejardines y bandejones. Las zonas se identificaron por medio de fotointerpretación de la imagen Geoeye-1 (captura Abril 2010; FONDECYT 1110183) y fueron digitalizadas usando polígonos a través del software ARCMap.

### 3.1. Definición de variables de análisis

Para definir los espacios que se analizarían, se realizaron visitas en terreno para corroborar su existencia, y su acceso público. Adicionalmente, sobre estos espacios se realizó una consulta municipal que permitió diferenciarlos entre espacios con manejo y sin manejo, para determinar aquellos que son de propiedad municipal. Además se diferenciaron según los tipos de uso y función urbana dentro de la ciudad, basándose en la ordenanza municipal de Valdivia.

Respecto a los elementos relevantes a medir, estos se eligieron en base a este estudio anterior que mostró la identificación de elementos clásicos como tráfico vehicular (vehículos), niños, arboles, aves gente perros y otros.

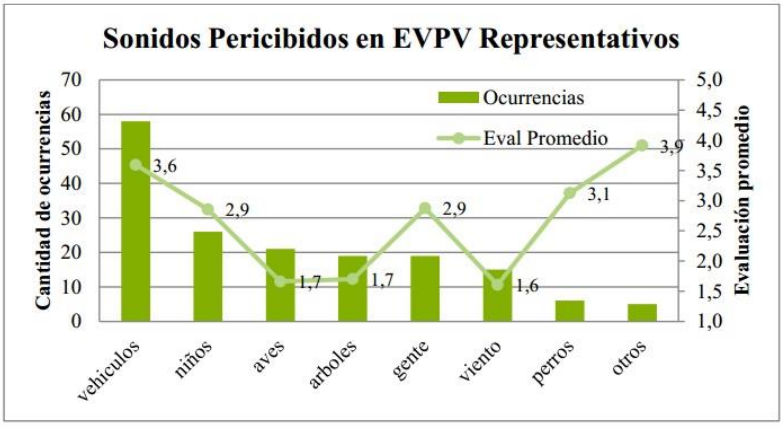



**Figura 1**. Frecuencia y calificación subjetiva de los sonidos percibidos los Espacios Verdes Públicos de Valdivia (EVPV), más representativos [Figueroa 2013 tomado de FONDECYT#11110183].

De las áreas anteriormente mencionadas, se determinaron 12 tipos de áreas verdes de acceso público todas las categorías, las cuales incluyen bandejones, cementerios, proyectos en creación, humedales, jardines, parques, paseos peatonales, plazas, plazoletas, recintos deportivos, sitios eriazos y verdones.

Para este estudio se eligieron 9 áreas verdes del conjunto de áreas municipales, que cumplieran los siguientes requisitos:

a) Acceso público. Para el propósito de la encuesta online y en el contexto de las políticas públicas, el foco está dirigido a áreas verdes en el sentido de "uso público"
b) Propiedad Municipal. A pesar de existir áreas de uso público no municipales, dos censos y encuestas previamente realizadas (2012 y 2013) en el contexto del proyecto FONDECYT 1110183, mostraron que las áreas municipales son en general más visitadas. Este factor es determinante para tener mayor probabilidad de que estas áreas sean reconocidas por las personas que contestarán la encuesta online.
c) Parques y/ plazas. Dentro de las diferentes categorías expuestas más arriba, y en base a los mismos censos previamente mencionados, son los parques y luego las plazas, las áreas verdes municipales más visitadas. Por esto se eligieron 3 de los 4 parques municipales de la ciudad (Santa Inés, Harnecker, Kramer) y luego plazas que mostraron una alta frecuencia de visitas.
d) Distribución homogénea. Cumpliendo los criterios anteriores se intentó maximizar una distribución homogénea haciendo especial énfasis en elegir al menos un área verde por zona, en complemento a la distribución de los parques. En este sentido se agregaron las plazas Pastene, Simón Bolivar, Las Animas, Plaza Chile y Bernardo O´Higgins.
e) Exclusiones. Tanto el Parque Saval como la Plaza de la República, fueron excluidas de esta selección. El Parque Saval es un parque de gran afluencia, sin embargo la mayor parte del año es un centro de eventos por lo que su uso no es representativo de un área verde típica de Valdivia. La Plaza de la República, también es de gran afluencia pero también posee características particulares tanto por su materialidad como por el uso cotidiano que se le asigna. Dado que el objetivo es medir la valorización acústica de las áreas verdes de Valdivia, ambos lugares no solo no representan los más "típico", sino que además presentan características que influencian la percepción y valorización tales como: equipamiento, seguridad, cercanía a calles entre otros. Además, tanto el Parque Saval como la Plaza de la Republica son lugares muy emblemáticos de Valdivia y al excluirlos se pretende disminuir la probabilidad de que la mayor parte de la población muestreada vía encuesta online, entregue información exclusivamente sobre estos dos lugares. Otro espacio verde importante en Valdivia es el Jardín Botánico de la UACh, que no se incluyó en este estudio, dado que corresponde a un espacio privado.

Adicionalmente se incluye una opción para agregar otra área verde en caso de que ningún de las anteriores fuese conocido por el encuestado.

De esta manera, se seleccionaron las siguientes áreas verdes:

1. Plaza Bernardo O'Higgins
2. Plaza Teniente Merino
3. Plaza Las Ánimas
4. Plaza Simón Bolivar
5. Plaza Pastene
6. Parque Harnecker
7. Parque Kramer
8. Parque Santa Inés
9. Plaza Chile

### 3.2. Encuesta

La encuesta considerada en este estudio consistió en un cuestionario en línea (www.encuestafacil.com) con un total de 846 encuestas válidamente recibidas y analizadas. Se consultó la sensibilidad al ruido ambiental, fuentes de ruido ambiental, de impacto del ruido ambiental en sus actividades y salud, su opinión sobre las áreas verdes y el paisaje sonoro de la ciudad y evaluación de las políticas públicas. La muestra se configuró principalmente con personas con estudios medios (48,5%), trabajan fuera de casa (36,4%), en el rango de edades comprendido entre 18 y 24 años (51,7%). El porcentaje de mujeres en la muestra alcanza al 48,8%, donde fue posible observar que el 29,9% de las personas entrevistadas reside más de 10 años en su vivienda y un 45,9% vive hace más de 10 años en la ciudad de Valdivia.

La encuesta online mostró que otras alternativas a las seleccionadas (las 9 áreas en estudio) no alcanzaron en conjunto un 41%. Es decir una proporción importante de personas dice visitar con más frecuencia otras áreas entre las cuales se destacan el Jardín Botánico de la UACh, el Parque Saval, y el Parque Urbano el Bosque. Cabe destacar que estos espacios no habían sido escogidos en la lista de la encuesta porque dos de ellos no son áreas verdes públicas, y el Parque Saval también es un centro de eventos. A pesar de lo anterior, estas tres áreas verdes poseen características comunes que las hacen atractivas y que quedan reveladas en las siguientes secciones en la encuesta. Estas características tienen gran relación con el aspecto natural, su gran superficie y la presencia de lagunas y/o humedales, en conjunto con una gran cantidad de vegetación representada principalmente por bosque nativo. Todos estos aspectos permiten, desde ya, destacar su función e importancia para la ciudad y sus habitantes.

**Tabla 1**. Porcentaje de encuestados que visitan las siguientes áreas verdes

| Área verde | Porcentaje |
|---|---|
| Plaza Bernardo O´Higgins | 1,13 |
| Plaza Teniente Merino | 1,01 |
| Plaza Las Animas | 0,63 |
| Plaza Simón Bolívar | 3,89 |
| Plaza Pastene | 1,51 |
| Parque Harnecker | 8,67 |
| Parque Kramer | 16,83 |
| Parque Santa Inés | 13,44 |
| Plaza Chile | 11,93 |
| Ninguna / Otras | 40,95 |

**Tabla 2**. Porcentaje de encuestados que visitan Otras Áreas Verdes (no incluidas)

| Área verde | Porcentaje |
|---|---|
| Jardín Botánico UACH | 20,69 |
| Parque Saval | 3,90 |
| Jardín Botánico UACH/Saval | 2,13 |
| Parque Urbano El Bosque | 1,65 |
| Otras | 71,63 |

De todos los aspectos evaluados, espacio, mobiliario, tranquilidad, naturaleza, ambiente sonoro y seguridad, las valoraciones más altas fueron asignadas a naturaleza, espacio y tranquilidad, dejando en último lugar el mobiliario, lo que es una característica usualmente determinante para el uso de espacios verdes.

Con respecto a la descripción del paisaje sonoro, éste muestra resultados similares respecto a la frecuencia con que se mencionan aspectos de la naturaleza. Por ejemplo, las aves y el viento son los elementos mayormente destacados como agradables y muy agradables. Por otro lado el tránsito vehicular fue calificado como desagradable para la mayor parte del rango de las personas encuestadas, como era de esperar. Interesantemente estos elementos naturales (lluvia/tormentas y aves) descritos como agradables parecieran ser de tal importancia, que en la pregunta siguiente varios de estos aparecen elegidos como sonidos característicos de la

ciudad. Así mismo, el elemento que les sigue en importancia es al sonido de la feria fluvial. Este último es un elemento cultural importante de la ciudad y está asociados a lo histórico y cultural suelen ser elementos destacados en el paisaje acústico.

Respecto a qué prioridad debe dar la autoridad a una serie de medidas para controlar el ruido ambiental, el 60% manifiesta que la mayor prioridad la deben tener el proteger las áreas tranquilas y educar a las personas sobre los efectos del ruido. Le siguen el mejoramiento del entorno sonoro de las área verdes y medir el ruido en la ciudad, seguido de mayor fiscalización, el prohibir la música en las calles es la alternativa que presento la prioridad más baja.

Algunos encuestados agregaron otras prioridades, como aplicar estudios y tecnología para el control de ruido producido por el transito e industrias, la protección de áreas verdes y la incorporación de más de estas y árboles en la ciudad.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados destacan la importancia de la incorporación de las áreas verdes como elemento central en la percepción de paisaje acústico urbano. Sin embargo a pesar de la evidencia de estudios internacionales que relacionan elementos naturales con un mejoramiento del paisaje sonoro, en la planificación las áreas verdes no son un elemento a considerar en esta función.

En otras palabras, y tomando en cuenta la multifuncionalidad de estos espacios cuando se usa el concepto de servicios ecosistémicos, podemos ver que es posible sacar mejor provecho a un área verde en cuanto a los beneficio que la comunidad puede percibir. Esto es especialmente cierto en Valdivia, en donde más del 58% de su superficie está cubierta en el algún grado por áreas verdes, ya sea formales (municipales), informales (acceso público pero de propiedad no municipal) y jardines domésticos, por lo tanto existiendo un gran potencial para explorar en profundidad la valoración del paisaje acústico. Este estudio se centró en un set de áreas verdes municipales de uso frecuente, sin embargo en la ciudad de Valdivia (limite comunal), existen áreas verdes formales 482 (superficie total de 184ha) y 184 (superficie total de 423ha) informales. Estas no solo difieren en tamaño sino en sus características, las cuales, como se ha mostrado en los resultados, determinarían una valoración acústica diferente.

Respecto a la distribución del tamaño promedio de las áreas verdes municipales, es evidente que la mayor parte de estos son pequeñas (≈4.069 $m^2$ ±19.781) en relación a los tamaños medios de las áreas verdes informales (≈15.511 $m^2$ ±62.992), y la superficie (espacio) es uno de los parámetros mejor valorados en los resultados de la encuesta online Los tamaños de las áreas verdes informales de Valdivia son mucho mayores, y las áreas que fueron mencionadas adicionalmente en la encuesta online, son tres parques con un promedio en tamaño de 26.6 ha.

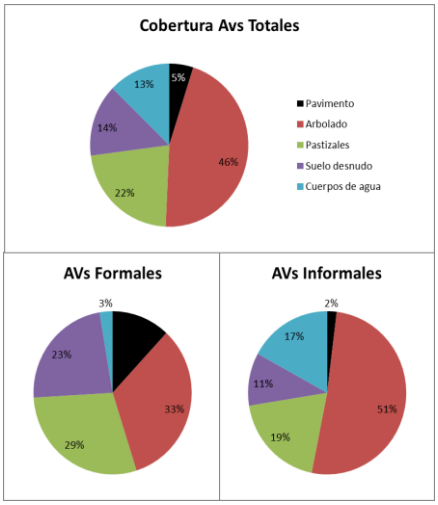



**Figura 2**. Coberturas por tipo de área verde (AVs). Fuente: FONDECYT #11110183.

La calidad o elementos que se pueden encontrar en estas áreas difieren profundamente entre las áreas verdes formales e informales, siendo los formales, dominados por arbolado, pastizales y pavimento, mientras que los informales están dominados por arbolado, pastizales y cuerpos de agua, que en la mayoría de los casos son humedales. Estas zonas poseen una alta diversidad de aves, las cuales se saben mejoran el paisaje acústico. Es decir los elementos asociados a "naturaleza" están más presentes en proporción a los de espacios con pavimento o suelos desnudos. Resulta evidente que, además del aporte sonoro, las áreas ricas en vegetación y aves proveen mayor absorción sonora que las zonas pavimentadas. Lo anterior contribuye a un ambiente acústico de mayor intimidad, orden y riqueza sonora que una zona rígida reflectante. El aporte acústico que proporcionan los cuerpos de agua, son elementos sonoros relevantes en la riqueza y variedad acústica que ofrecen a las aves y animales, tranquilidad, y variedad paisajística.

Otra gran diferencia tiene que ver con su distribución en el territorio. Si bien las áreas verdes municipales están relativamente homogéneamente distribuidas, las áreas verdes informales, están principalmente concentradas en la zona suroeste de la ciudad, zona que además presenta un rápido crecimiento principalmente a través de la creación de viviendas sociales

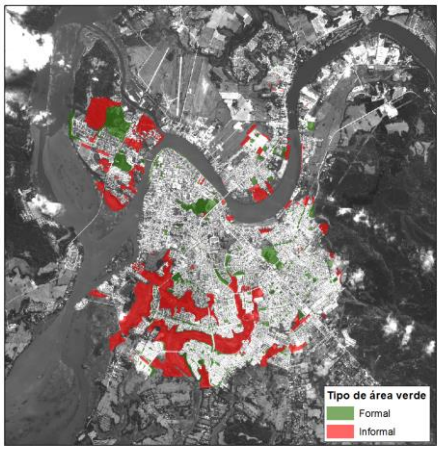



**Figura 3**. Distribución de áreas verdes formales e informales en Valdivia. Fuente: FONDECYT #11110183

Se puede observar desde el mapa de ruido de Valdivia que estas zonas también presentan un nivel relativamente menor de ruido, sobretodo de día.

## 5. CONCLUSIONES

En virtud de los resultados obtenidos de este primer estudio exploratorio:

1. La población encuestada en Valdivia valora el paisaje acústico en las verdes en relación a aspectos y elementos asociados con la naturaleza
2. Al momento de priorizar acciones por parte de las autoridades, se pide no solo resguardar espacios de tranquilidad, sino que además se hace mención explícita de mejorar y aumentar las áreas verdes y árboles de la ciudad.
3. Valdivia posee una gran cantidad de áreas vedes cumpliendo estándares de la OMS en cuento superficie por persona, sin embargo si se incorporan explícitamente las áreas verdes informales, los valores aumentan ostensiblemente.
4. Las áreas verdes informales que pudiesen ser incorporadas a la red de áreas verdes de la ciudad, presentan condiciones ideales para mejorar la valoración del paisaje acústico en las áreas verdes. Estás presentan tamaños promedio mayores, gran cantidad de arbolado, y elementos naturales como agua, y flora y fauna.

Por todo lo anterior se destaca el potencial que tienen estás áreas, que hasta hoy están abandonadas o bien han ido desapareciendo por rellenos ilegales y construcciones de viviendas. Se deben potenciar, porque además están distribuidas en una zona de la ciudad en

donde la población está creciendo rápidamente. Se debe evaluar el costo-beneficio de mejorar con elementos naturales las áreas municipales existentes y/o potenciar aquellas informales.

Cabe destacar que para algunos elementos como la presencia de aves, habrá importantes restricciones que impedirán aumentar la diversidad de estas en ciertas plazas por ejemplo por no poseer árboles o por estar aisladas de áreas con una comunidad de avifauna compleja.

Finalmente, se debe explorar la utilización de estrategias innovadoras para incrementar la valorización del paisaje acústico por parte de la población. Un ejemplo es el estudio piloto realizado recientemente en Valdivia (*Proyecto Explora: Conociendo, indagando y valorizando los paisajes acústicos de mi ciudad, http://paisajeacustico.blogspot.com/2012/06/inauguracion-proyecto-sobre-valoracion.html*), donde se incorporaron herramientas simples y se logró generar cambios en la percepción y valorización del paisaje a través de su conocimiento.

## 6. AGRADECIMIENT0S

Este estudio fue realizado gracias al proyecto “Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de Tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación” (2015), ejecutado por el Instituto de Acústica de la Universidad Austral, y financiado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. ID: 608897-50-LP13.

## 7. REFERENCIAS

1. Barbosa O, Tratalos JA, Armsworth PR, Davies RG, Fuller RA, Johnson P & Gaston KJ (2007). Who benefits from access to green space? A case study from Sheffield, UK. Landscape and Urban Planning 83: 187-195.
2. Barbosa O (2014). Decreasing urban green space availability under increasing urbanization patterns: what´s happening to ecosystem services provision and urban biodiversity?. FONDECYT#11110183
3. Booth JE, Gaston KJ, Armsworth PR (2010) Who benefits from recreational use of protected areas? Ecology and Society 15(3): 19.
4. Carles J.L., et al.; “Incidencia de los aspectos sonoros en la percepción de la calidad ambiental de las plazas y espacios públicos. El caso de Alcalá de Henares“; 1999.
5. Crane, P., Kinzig, A., (2005). Nature in the metropolis. Science 308, 1225–11225
6. Davies RG, Barbosa O, Fuller R, Burke N, Lewis D, Warren P H, Gaston KJ (2008). City-wide relationships between green space and urban form. Urban Ecosystems 11:269-287.
7. Figueroa, Felipe (2013), Valoración Acústica Subjetiva de Espacios Públicos Abiertos en Valdivia, Chile. Magister en Acústica y Vibraciones, Universidad Austral de Chile.
8. Fuller, R. a, Irvine, K. N., Devine-Wright, P., Warren, P. H., & Gaston, K. J. (2007). Psychological benefits of greenspace increase with biodiversity. Biology Letters, 3(4), 390–4.
9. Fuller RA & Irvine KN. (2010). Interactions between people and nature in urban environments. In Urban Ecology ed: Kevin Gaston Cambridge University Press, Cambridge.
10. Gaston KJ (2010). Urbanization. In Urban Ecology ed: Kevin Gaston Cambridge University Press.
11. Keniger, L. E., Gaston, K. J., Irvine, K. N., & Fuller, R. A. (2013). What are the ¬Benefits of Interacting with Nature?, 913–935. doi:10.3390/ijerph10030913
12. Kang J., et al.; “Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces”; Building and Environment, Volume 45, Issue 1, January 2010, Pages 150-157
13. McDonald RI, Forman RTT, Kareiva P (2010).Open Space Loss and Land Inequality in United States' Cities, 1990-2000. Plos One 5: e9509.
14. Ministerio del Medio Ambiente (2015) Elaboración y Análisis de Mapas de Ruido de Tres Conurbaciones Mediante Software de Modelación. Informe Final. Proyecto Ejecutado por el Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile. ID: Nº 608897-50-LP13
15. Morimoto Y (2001).Biodiversity and ecosystem services in urban areas for smart adaptation to climate change: "Do you Kyoto?”. Landscape and Ecological Engineering, 7: 9-16.
16. Pauchard A, Barbosa O et al (2013) Latin America: rapid urban development and social economic inequity threatens biodiversity hotspots, chapter 28. In: Elmqvist T, Fragkias M, Goodness J (eds) Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities -a global assessment. Springer, Dordrecht
17. Tratalos J, Fuller RA, Warren PH, et al. (2008).Urban form, biodiversity potential and ecosystem services Landscape and Urban Planning. Landscape and Urban Planning 83 (2007) 308–317.
18. Ulrich, R.S., Simonst, R.F., Lositot, B.D., Fioritot, E., Milest, M.A., Zelsont, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. J. Environ. Psych. 11, 201–230.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# PAISAJES SONOROS EN SAN MIGUEL DE TUCUMÁN, ARGENTINA: INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA PARA SU CONCIENCIACIÓN.

PACS: 43.15.+S

Garzón, Beatriz[1]; Soldati, Elisa[2]; Paterlini, Leonardo[1] Perera, Sofía; Rufino, Miguel; Orellana, Marcia; Ponce, Florencia[3] (FAU-SCAIT, UNT - CONICET, MInCyT)[1], (FAU-SCAIT, UNT)[2], (FAU, UNT)[3]

**Palabras clave:** Hábitat Sustentable; Acústica Urbana. Paisaje Sonoro; Concienciación.

**ABSTRACT**

This work was performed as part of the elective subject "Sound and Habitat" by the professorship of “Ambiental II”, of Enviroment Conditioning Institute, from the Faculty of Architecture and Urbanism of the National University of Tucuman, Argentina. It aims to study, identify and analyze urban areas of the city of San Miguel de Tucuman who are subjected to noise pollution. The task aims to achieve an approach to the problems of the city soundscape for future research.
Also, it has the purpose to design and develop physical spaces for temporary transfer and awareness of the actions and experiences developed. The corollary of it is the creation and realization of the 1st event in Tucuman on "Awareness Day Noise".

## INTRODUCCIÓN

La Provincia de Tucumán se encuentra en la región NOA de la República Argentina, punto estratégico geográfico de conexión del norte con el centro del país. Su economía está muy ligada a la producción industrial. Cuenta con la Universidad Nacional de Tucumán, que es la universidad pública más importante de la región. La misma, funciona como polo de atracción a estudiantes e investigadores, etc. Estos factores, y otros, hacen que Tucumán se sitúe como ciudad cabecera de Región. La población según los datos del Censo 2010 es casi de 1.500.000 habitantes, siendo un 77% población urbana. La misma es generadora en gran medida de polución de diferentes índoles. “*El parque automotor del país alcanzó, a fines de 2014, los 11.500.000 de unidades, incluidos automóviles, vehículos comerciales, livianos y pesados. Según la Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes (Afac)”* (La Gaceta, 19 de abril 2015), convirtiéndose el mismo en productor de gran parte de la contaminación ambiental urbana. Hacia el Sur de la Capital, se encuentra la zona fabril, con numerosas ciudades que crecieron en torno a la industria del azúcar.
Del “Plan Estratégico Urbano Territorial Para La Ciudad De San Miguel De Tucumán SMT 2016” (Municipalidad de San Miguel de Tucumán, 2010) se desprende la necesidad de hacer eco en la problemática de la contaminación sonora. *“San Miguel de Tucumán es una ciudad que presenta distintas situaciones de vulnerabilidad ambiental que atentan contra la salud de la población…”, “…la contaminación aérea (humo, hollín, polvo atmosférico, quema de caña) y la contaminación sonora, en particular en el*



*área central, donde se superan los decibeles tolerables para la población, son algunas de las situaciones más problemáticas que se presentan y que reclaman una solución para promover otra calidad de vida a sus habitantes."*

Si bien es mencionado en el plan estratégico la necesidad de abordar éstos temas, a continuación no hace mención alguna en cómo solucionarlo, más que alguna mención a hacer controles al sistema de transporte público y las posibilidades de mejorarlo, reduciendo paulatinamente el uso del vehículo de transporte privado. *"La presencia de medios de transporte ilegales no sólo contribuye al deterioro del sistema público de transporte de pasajeros, sino también a la congestión del tránsito en el área central."*

Entendemos que tal problema, no sólo afecta al funcionamiento de la ciudad, sino que genera un polo de polución acústica, que no está siendo abordada por el municipio desde tal perspectiva.

El problema del ruido en San Miguel de Tucumán es conocido, ha sido tratado y denunciado en publicaciones en los diarios de tirada provincial más importantes, numerosas veces. *"El ruido ocupa un lugar en el espacio sonoro de la ciudad. Basta permanecer un rato en las horas pica en la calle Santiago del Estero, entre Laprida y 25 de Mayo, o en Crisóstomo Álvarez, entre Chacabuco y Entre Ríos, para comprobar la polución sonora, que padecemos como si fuera natural"* (La Gaceta, 2015). Existen en la actualidad normativas vigentes en la provincia, pero no son aplicadas como deberían o ni siquiera son de público conocimiento. *"Hace unos meses, en la calle San Juan al 1100, un bar sometió a los habitantes del edificio de calle José Colómbres al 300 a una sistemática y desaprensiva agresión sonora, que viola la ordenanza municipal Nº 288/78. Esta norma prohíbe los ruidos molestos en horario nocturno" (Blog Acústica Legal – 2011).*

## ESTADO DE SITUACION DE LA PROBLEMÁTICA

El paisaje sonoro son todos los sonidos que componen la identidad de una zona. En la ciudad de San Miguel de Tucumán, podemos decir que por su proximidad a los cerros, zona de una vasta flora y fauna propia de la yunga, debería encontrarse un paisaje sonoro más relacionado con lo natural. La ciudad de San Miguel de Tucumán, al contrario de lo que se espera, tiene un paisaje sonoro más relacionado con los vehículos automotores.

La contaminación sonora es el exceso de sonido que altera las condiciones normales de un ambiente en una determinada zona. El exceso de ruido automotriz, por sobre otros, está generando una clara contaminación sonora en la ciudad, en desmedro de su paisaje, de sus personas, en definitiva, el hábitat.

A partir de la materia electiva "Sonido y Hábitat", que se dicta en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT), se conformó un equipo de trabajo de interesados en la problemática de la contaminación acústica en la ciudad de San Miguel de Tucumán.

El equipo coordinado por la Especialista Arquitecta Beatriz Garzón, el Arquitecto Leonardo Paterlini y Elisa Soldati, cuenta con numerosos colaboradores estudiantes con una formación básica teórica sobre la acústica arquitectónica, convirtiéndose el tema del paisaje urbano en una materia a estudiar y desarrollar como práctica de extensión a la Facultad. El proceso debería formar a los participantes, acercarlos a tener un real conocimiento en la situación que viven y a generar espacios de discusión sobre la temática del ruido y sus consecuencias.

De las primeras reuniones al respecto, se realiza un detalle sobre cuáles son las tareas que se realizarán dentro del grupo y cuales se esperan sean los alcances del mismo.

Se revisó que en Argentina existen diversas leyes y normativas que dan un marco legal a la cantidad de ruido que puede existir en las ciudades.

La ley 1540 y la ordenanza 288 le dan un marco legal a la problemática. Tienen como objeto prevenir, controlar y corregir la contaminación acústica que afecta tanto a la salud de las personas como al ambiente. Nos da un parámetro de valores límites de decibles permitidos para un rango horario. 65Db para un período diurno y 50Db para un período nocturno

Además, una investigación en diarios locales, además de la propia experiencia de usuario que tienen los personajes actuantes acerca una serie de puntos de ruido dentro del casco urbano de la ciudad a estudiar.
Para poder entender sobre la ciudad se realizará una breve descripción de la estructura de la misma. San Miguel de Tucumán se fundó en 1685 en el lugar que ahora ubica. En aquel entonces se realizó la fundación en un trazado ortogonal de 9x9 manzanas alrededor de una plaza principal, donde se ubicaban los edificios más representativos del poder eclesiástico, político, económico. Calles angostas sin veredas y las viviendas sobre las líneas municipales, era como se configuraba el paisaje urbano. 4 calles de ronda circundaban el trazado fundacional. Para 1850 se produce un ensanche de la ciudad, hasta llegar a una cuadrícula de 14 por 18 manzanas que estaban rodeadas por 4 bulevares que tenían que ver con la concepción estética de las ciudades de la época.
Debe resaltarse que en el trazado fundacional las calles quedaron inclusive más pequeñas de lo que fueron construidas en primer lugar, pues se agregaron las veredas, separando la circulación peatonal de la vehicular que ya comenzaba a aparecer en la ciudad. El ensanche previó tal situación y las calles del mismo son de mayor ancho, además de contener veredas y éstas, árboles en su figuración (cosa que el casco fundacional carecía).
Es de importancia mencionar tal situación funcional y estética de la ciudad pues a lo largo de los años, y si bien la ciudad creció en gran medida fuera del casco fundacional y del primer ensanche, tales funciones y estéticas condenaron de alguna manera a el centro tucumano a ser caótico y no poder absorber la evolución de la sociedad hasta el día de la fecha.
El centro de San Miguel de Tucumán es caótico. En el mismo se concentran los poderes en torno a la “Plaza Independencia” (plaza central) y a lo largo de la calle San Martín (que corre de Este a Oeste) se concentran todo el comercio bancario. Las calles de ronda (fundacionales) General Paz, Sáenz Peña, Santiago y Avenida Salta, toman gran volumen del tránsito vehicular que sale desde el microcentro (casco fundacional).
El factor del tránsito y su constante crecimiento, falta de una regulación al respecto y poca inversión privada y estatal en el servicio público de transporte de pasajeros hace de éste el factor principal de producción de contaminación acústica en la ciudad.

## PROPÓSITOS

El siguiente trabajo tiene como propósitos contribuir a la identificación de puntos de ruido en la ciudad de San Miguel de Tucumán. El estudio de estos diferentes puntos de ruido en la ciudad de San Miguel de Tucumán, al norte de Argentina, donde la problemática del ruido tiene nada o muy poco estudio o intervención por las partes municipales.
Así también se busca la concienciación de la población respecto de la problemática del ruido en las ciudades y el involucramiento de la población a partir de la transferencia de los resultados que se arrojaron en dicha investigación.

## OBJETIVOS

Ellos son:
**Objetivos generales**

- **Investigar** cuales son los puntos urbanos de la ciudad de San Miguel de Tucumán que tienen problemas de ruido.
- **Identificar** dichos lugares y clasificarlos según el conocimiento en la temática existente.
- **Relevar** dichas sectores con instrumental apropiado acústico, de audio y video.
- **Crear** un espacio de discusión sobre la problemática dentro de un ámbito académico de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán.
- **Organizar** y **coordinar** un espacio de transferencia y concienciación donde se vuelquen las experiencias antes desarrolladas.

**Objetivos particulares**

- **Investigar** en los periódicos locales posibles denuncias en sectores urbanos producidos por ruidos que estén interfiriendo con tareas específicas que se desarrollan en la ciudad. Teniendo

en cuenta que se trata de una "estrategia de investigación-Acción Participativa" también se tienen en cuenta aquellos puntos de la ciudad conocidos por la experiencia de usuario que son polos de polución acústica.

- Según el sector de la ciudad, **identificar** cuáles son aquellos ruidos que están produciendo la polución acústica.
- Según el tipo de polución acústica a la que está sometido cada sector, **realizar** una clasificación de las áreas en estudio, según tipos de ruidos y rangos de intensidad a la que están siendo sometidas.
- **Realizar** un protocolo de medición el cual nos servirá para realizar las mediciones urbanas bajo las mismas condiciones físicas en cada área de estudio.
- **Relevar** las áreas identificadas con sonómetro, cámaras fotográficas, cámaras de video y audio, tomando nota de las diferentes mediciones y eventos puntuales que pudieran hacer variar las intensidades (ambulancias, escapes de vehículos, etc.).
- **Clasificar** los datos obtenidos y **estudiar** diferentes métodos para la transferencia de los mismos.
- **Crear** un espacio de reflexión y análisis sobre la información obtenida de los relevamientos.
- **Crear** una comisión de interesados en trabajar en la problemática del ruido en el paisaje urbano, dentro de la materia "Sonido y Hábitat" que se dicta en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Tucumán.
- Se propone **organizar y coordinar,** en el marco de la semana de ruido a nivel internacional, un evento donde se difunda la problemática del ruido en nuestra ciudad, mostrando los problemas que genera en el ser humano, mostrar los resultados obtenidos de los relevamientos, así como también hacer un espacio de reflexión para dar lugar a la música como anteposición al ruido.

## METODOLOGIA USADA

A partir de este acercamiento a la situación estructural de la ciudad y su fisonomía, a través de diferentes lecturas además de la propia experiencia como usuarios de la ciudad, se establecen focos de contaminación acústica y se los clasifica según su potencial producción de ruido, teniendo en cuenta su ubicación, cantidad de tránsito, y otros factores que pudieran producir ruido en tales puntos.

Los puntos elegidos para ser estudiados son: Calle Jujuy esquina Crisóstomo Álvarez; Av. Salta esquina San Martín; Av. Salta esquina Mendoza (todo este sector corresponde a la calle de ronda del trazado fundacional hacia el oeste); Calle Córdoba esquina Muñecas, Calle Córdoba esquina Laprida, Calle Córdoba esquina Virgen de la Merced, Calle Córdoba esquina Monteagudo (la calle Córdoba lleva gran parte del tránsito de transporte público además de ser una arteria conectora de la ciudad en sentido Este Oeste); 25 de Mayo 265 (calle más importante en lo comercial, y a esta altura se encuentra el Centro Cultural Eugenio Virla y enfrentado al mismo un gimnasio de gran afluencia de personas, sólo basta por pasar por esa vereda para escuchar el ruido que produce el gimnasio); Calle 24 de Septiembre esquina 25 de mayo (encuentro de las calles que estructuran la ciudad en sentido Norte-Sur y Este-Oeste).

## PROTOCOLO DE MEDICIÓN

Al tratarse de una medición con cierto grado de subjetividad se decide realizar previamente a los ensayos un protocolo de medición que será el que le dé cierto marco de especifidad y rigurosidad a las mediciones. Las mismas serán realizadas en ámbitos urbanos, haciendo un relevamiento con sonómetro, además de fotográfico y de video.

Las pautas decididas a tomar son:

1) Las mediciones serán siempre hechas por la misma persona, y tratándose de un sonómetro que no guarda en su memoria las diferentes mediciones, otro sujeto será quien vaya tomando nota de las distintas mediciones además de cuales son aquellos eventos que producen los picos de decibelios en el aparato.
2) Todas las mediciones se realizarán el mismo día. El mismo deberá ser un día de normal uso de la ciudad (día hábil) entre las 9 y las 13 horas.

3) Las mediciones se realizarán en mano del operador, respetando una altura de 1.60 metros respecto del nivel de vereda, y a una distancia de 2 metros de la calle. En los casos de esquina, será en diagonal a la misma.
4) Cada medición tendrá una duración de 10 minutos.
5) La lectura del medidor sonoro se realizaran en compensación A en respuesta S (lenta) para mediciones promedio en un intervalo de tiempo de 2 minutos, y en respuesta MAX HOULD para mediciones de ruidos muy altos en un intervalo de tiempo de 5 minutos.

- **MEDICIONES**




Las mediciones se realizaron el día 6 de abril de 2015 en los 9 puntos antes mencionados en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Todas las mediciones fueron realizadas en el lapso entre las 9 horas y 13 horas. Del primer acercamiento se toma en cuenta, según el conocimiento del usuario, ya que esta investigación se trata de un acercamiento a la problemática del ruido en el paisaje urbano, cuáles serán aquellos puntos, dentro de los 9 seleccionados, que mayor incidencia tienen sobre la acústica urbana. Las siguientes mediciones corresponden a los puntos más relevantes por la intensidad y frecuencia de ruidos:




- **Calle Córdoba esquina Monteagudo**: la medición se realizó a las 9.50 de la mañana. Para la respuesta SLOW (promedio de la medición durante un determinado tiempo) del sonómetro se obtuvo 74.16Db, mientras que para la función MAX HOLD la máxima notación fue de 101Db cuando un autobús frenó.
- **Calle Córdoba esquina 25 de Mayo**: la medición se realizó a las 10.30 de la mañana. Para la respuesta SLOW del sonómetro se obtuvo 73.3Db, mientras que para la función MAX HOLD la máxima notación fue de 98Db cuando pasaba una ambulancia.
- **Calle Jujuy esquina Crisóstomo Álvarez:** la medición se realizó a las 11.33 de la mañana. Para la respuesta SLOW del sonómetro se obtuvo 72.8Db, mientras que para la función MAX HOLD la máxima notación fue de 97.6Db cuando se escucharon unas bocinas sonar.
- **Calle 25 de Mayo esquina 24 de Septiembre**: la medición se realizó a las 11.58 de la mañana. Para la respuesta SLOW del sonómetro se obtuvo 71.6DB, mientras que para la función MAX HOLD la máxima notación fue de 90.3Db cuando se escuchó el estruendo de una bomba de una manifestación cercana.






**CREACIÓN DE UN ESPACIO DE REFLEXIÓN Y EVALUACIÓN SOBRE LA TAREA DESARROLLADA**



Dentro del ámbito de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán, se desarrollan una serie reuniones donde se aborda el tema sobre las mediciones realizadas y el conocimiento que se tiene sobre la problemática.

Se cree necesario la creación de un espacio de difusión de la problemática acústica en el paisaje urbano, los resultados obtenidos, y los efectos que producen en las personas a título de concientización de la población.

**RESULTADOS ALCANZADOS**

En cuanto a los resultados alcanzados, se llevaron a cabo en 2 etapas que abarcan: **1.** El estudio de antecedentes; la elaboración del el marco teórico; la selección de las herramientas metodológicas; la identificación, relevamiento y el análisis de áreas geográficas y puntos específicos de estudio; la verificación de sus niveles acústicos mediante mediciones con instrumental (sonómetros); su documentación en audio y video; la determinación de sus efectos psicofísicos; la generación de alternativas para lograr la difusión y transferencia para concienciación sobre la problemática del ruido en las ciudades. Aspectos importantes a destacar, a partir de éstos, es que la ciudad está sometida durante los días de normal funcionamiento a niveles sonoros que son perjudiciales para la salud de las personas. Lo importante mencionar es que casi en su totalidad es provocado por el tránsito de vehículos, privados, públicos o de transporte público. Como se mencionó anteriormente existen normativas y reglamentaciones en la ciudad, pero no son aplicadas en tales casos como los del tránsito, y en gran medida (a tono de opinión pues no se hicieron tales estudios) es probablemente el mayor productor de contaminación sonora dentro de la urbe. Estos resultados permitieron enunciar las siguientes consideraciones: a) los niveles de obtenidos 85 a 101Db de las mediciones realizadas posibilitaron determinar las zonas con contaminación acústica y de impacto posible sobre las condiciones psicofísicas de los habitantes urbanos; b) la necesidad.

**2.** Diseño, coordinación y desarrollo del 1er. evento en Tucumán sobre el “Día Internacional de Concienciación sobre el Ruido”, realizado el 29 de abril de 2015 con aval de la AdAA (Asociación de Acústicos Argentinos) dentro del ámbito Facultad de Arquitectura y Urbanismo y

de la Universidad Nacional de Tucumán; durante el mismo se expusieron afiches técnicos e informativos, se repartieron volantes en la vía pública, se realizaron exposiciones técnicas e informativas, se exhibieron videos sobre los paisajes urbanos detectados y analizados con sus respectivas instancias de mediciones; asimismo, se brindó un concierto de música a cargo de estudiantes de la facultad.

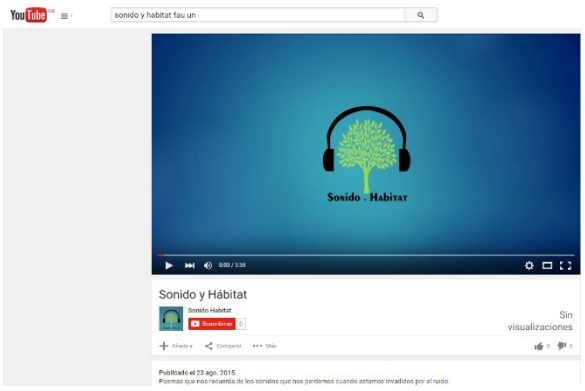



A tal fin, se organizó y llevo a cabo en el marco de la semana mundial sobre la concientización sobre el ruido, el 29 de abril de 2015 el primer "Día de concienciación sobre el ruido" dentro de la institución Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán y con el aval de la AdAA (Asociación de Acústicos Argentinos).

Dentro de tal evento, se prepararon afiches informativos sobre las distintas áreas de enfoque sobre la problemática del ruido en nuestras sociedades. Los mismos fueron sobre "Paisaje Sonoro"; "Contaminación Sonora" y "Acústica Arquitectónica". Además, se presentaron 3 videos institucionales que fueron realizados en su totalidad por el equipo y expuestos por primera vez en tal evento.

- Video institucional presentación que era expuesto en las inmediaciones de la facultad invitando al público que se acerque a la muestra. El mismo puede ver en https://youtu.be/4FvfFQsBzOk
- Video sobre la problemática de paisaje urbano según la tareas que se desarrollaron y fueron descriptas anteriormente. El video puede verse en https://youtu.be/KTSb9jlrYzU
- Video sobre los sonidos que pueden apreciarse una vez que el ruido se disminuye. El mismo puede verse en https://www.youtube.com/upload
- Acompañando tal muestra, donde se difunde la labor desarrollada, una alumna hizo una interpretación en flauta traversa de la canción "Colores en el Viento" de la película "Pocahontas" de Disney.También se repartieron panfletos informativos en las zonas cercanas a la facultad de arquitectura y se informó a los transeúntes al respecto. Una clara intención de involucrar a la sociedad en esta temática muy poco abordada.

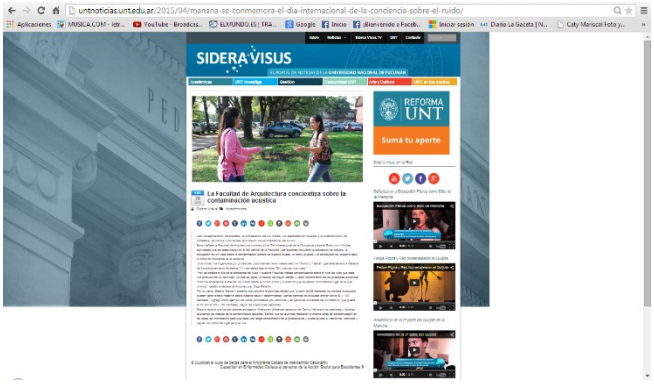







**3.** A partir del "Día del sonido" y la difusión de la problemática de la contaminación acústica, diversos medios de la provincia se hicieron eco y realizaron publicaciones pertinentes. Tales medios hicieron mella en la innovadora propuesta, además de agregar en las publicaciones algunas de los datos que se fueron obteniendo de la investigación del Paisaje Sonoro de Tucumán.




## CONCLUSIONES

El ruido, también, es una forma de contaminación, a la que no se le suele prestar suficiente atención y no se toma conciencia de la misma por no ser tan notoria como la contaminación del aire o del agua. Sin embargo las consecuencias de la contaminación acústica sobre las sobre las personas o el ambiente son acumulativas pudiendo llegar a ser irreparables.
Nuestra sociedad no toma conciencia sobre la necesidad de un ambiente sonoro saludable. La contaminación acústica es un problema que podemos mejorar entre todos (instituciones, administraciones y sociedad) contribuyendo a reducir los niveles de ruido aplicar las normas y ordenanzas vigentes, crear otras complementarias y hacerlas cumplir.
La problemática del ruido en nuestras ciudades, el paisaje sonoro, la contaminación acústica y la falta de implementación de normativas, hacen de éste área un espacio casi en blanco en la comunidad. Y que la investigación, estudio y desarrollo de alternativas acústicamente apropiadas y apropiables para combatir el problema del ruido es de gran importancia. Así también se debe seguir trabajando en el área de la transferencia y concientización de la población para que entre todos logremos llegar a tener un hábitat apropiado y sustentable.

## CONSIDERACIONES FINALES

A partir de las tareas realizadas, se considera que el paisaje urbano tucumano está siendo sometido a altos niveles de contaminación sonora, con la suave existencia de legislaciones al respecto, pero aún menos control por parte de los municipios.
Existe un alto desconocimiento de la población al respecto de los problemas que puede traer aparejado el exceso de ruido en la vida cotidiana.
Hay una falta de generación de profesionales formados en la materia que desarrollen en la ciudad tareas de investigación y concienciación en la materia.
Se considera importante continuar la tarea de relevamiento del paisaje urbano de la ciudad de San Miguel de Tucumán, ampliando los puntos referencia y tomándolos como puntos aislados en una situación particular, sino haciendo estudios minuciosos sobre contaminación sonora, que reflejen la situación real del paisaje sonoro urbano.
Es importante la formación de profesionales que aborden el tema y tomen medidas que impacten a nivel social local.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archivo "La Gaceta" – "El parque automotor creció el 2%" – Tucumán, Argentina - Domingo 19 de Abril 2015.
- Archivo "La Gaceta" – "La contaminación sonora pone agresiva a las personas" – Tucumán, Argentina - 14 de febrero de 2007.
- Plan estratégico urbano Territorial para la Ciudad de San Miguel de Tucumán SMT2016 – Municipalidad de San Miguel de Tucumán, 2010

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ESTUDIO DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN UNA PEQUEÑA LOCALIDAD DE EXTREMADURA: HERRERUELA (CÁCERES, SPAIN)

PACS: 43.50.Qp

Sierra-Limpo, Mª del Carmen[1]; Méndez-Sierra, Juan A.[1*]; Barrigón-Morillas, Juan M.[1]; Vílchez-Gómez, Rosendo[1]; Prieto-Gajardo, Carlos[1]; Rey-Gozalo, Guillermo[2]; Montes-González, David[1]; Atanasio-Moraga, Pedro[1].

[1] Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España
Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03
E-mail: jmendez@unex.es

[2] Universidad Autónoma de Chile, 5 Poniente 1670,
3460000 Talca, Región del Maule, Chile;
E-mail: greyg@uautonoma.cl

## ABSTRACT

Again, within the general framework of evaluating the quality of different sonorous environments, mainly in Extremadura region, we will focus on this project in the small village of Herreruela (400 inhabitants), located in the province of Cáceres, where we have made controlled recordings (3 min) at specific points in the city (10 points) by the binaural system NoiseBook (Head Acoustics), while surveying to the closest inhabitants of recording points (five surveys per point). Also we have submitted audition recordings and surveys to a group of people (5 persons) non-residents, which we call "*ex situ*" versus the people we call "*in situ*" in the village, and we will compare their results with those of usual residents.

## RESUMEN

Una vez más, dentro del marco general para ir evaluando la calidad de diferentes ambientes sonoros, principalmente de Extremadura, vamos a centrarnos con este estudio en la pequeña población de Herreruela (400 habitantes), situada en la provincia de Cáceres, en donde hemos realizado en puntos específicos de la localidad (10 puntos) grabaciones controladas (3 minutos), mediante el sistema binaural NoiseBook (Head Acoustics), a la vez que encuestamos a los habitantes próximos a los puntos de grabación (5 encuestas por punto). También hemos sometido a audición de las grabaciones y encuestas, a un grupo de 5 personas no residentes, que denominaremos "*ex situ*" frente a los habitantes "*in situ*" en la localidad, y compararemos sus resultados con los de los residentes habituales.

## INTRODUCCIÓN

Paisaje sonoro es un término relativamente moderno. Ha sido definido de diferentes maneras por investigadores de la comunicación, por artistas sonoros y compositores. Probablemente el término fue popularizado por el compositor e investigador canadiense Murray Schafer [1,2] a finales de los años setenta, siendo desde entonces, utilizado por investigadores y compositores de distintas maneras. Para Schafer, un paisaje sonoro es cualquier campo acústico: una composición musical, un programa de radio, un medio de ambiente acústico, etc. No se limita únicamente a espacios exteriores.

El compositor e investigador canadiense Barry Truax [3] diferencia lo que es un medio ambiente sonoro de un paisaje sonoro. El primero, dice, comprende toda la energía acústica en un contexto dado, mientras que el segundo es la comprensión de ese medio ambiente sonoro por aquellos que viven en él y lo están creando continuamente. Para él, la audición es imprescindible, y, por tanto, el paisaje sonoro es la suma del individuo y el medio ambiente.
Para otros investigadores es considerado como una “escena sonora”, es decir, un conjunto de elementos en el tiempo que expresan una situación.

Sin embargo, no resulta fácil de estudiar, principalmente por ser un elemento del medio natural efímero, cuyas propiedades varían constantemente en el tiempo. Representa un elemento intangible, difícil de parametrizar. Esta tarea se ve dificultada, además, por la influencia que tienen sobre la percepción del paisaje sonoro el resto de los sentidos y las emociones que éstos provocan. Por ello, todavía están pendientes de definición los modos para determinar la aportación específica de un *paisaje sonoro* a la *calidad de vida* percibida de una comunidad. Es necesario contar con herramientas cualitativas: las respuestas y reacciones subjetivas de los usuarios de la ciudad.

En este estudio, hemos intentado acercarnos al paisaje sonoro de una población pequeña, por medio de mediciones de magnitudes objetivas, también a través de encuestas a los habitantes, así como las reacciones de oyentes externos a la población ante las audiciones de grabaciones realizadas en Herreruela.

Se trata de un municipio de la provincia de Cáceres, Comunidad de Extremadura (Spain), cuya población no supera los 400 habitantes. La actividad principal se limita a explotaciones agropecuarias familiares y pequeños negocios (empresa de transporte, una pequeña productora de televisión, farmacia, dos tiendas, una panadería, una casa rural y cuatro bares).

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Trabajo de campo

Para la realización de este trabajo se han seguido los siguientes pasos:

1) Elección de los puntos de grabación.

Los puntos en los que se realizado la grabación se escogieron intentando repartirlos por toda la población, sin dejar ninguna zona “vacía”, pero teniendo en cuenta las fuentes sonoras o ambientes sonoros diferentes de la localidad. La mayoría son plazas, principalmente, por ser puntos de encuentro o de actividad.

2) Recogida de datos: grabaciones y encuestas.

2.1.-) Grabaciones:

Las grabaciones han sido realizadas entre los meses de Noviembre, Octubre y Diciembre de 2013, mediante el sistema NoiseBook (Head Acoustics), en periodo diurno, entre las 11:00 y

las 13:30, evitando las horas de salida y entrada del colegio y los trabajos, (las 9:00 y las 14:00), en las que el sonido registrado no representaría el paisaje sonoro habitual. La posición tomada en los puntos de medición ha sido, al menos, a 2 metros de la fachada más cercana y a 1,5 metros del suelo (siguiendo norma ISO 1996-1,2 [4]). La duración de las grabaciones ha estado alrededor de los cinco minutos, en un análisis posterior han sido recortadas a tres minutos, para evitar ruidos ajenos al paisaje sonoro en el inicio o final de la grabación con la puesta en marcha o desconexión del sistema de grabación. Se han realizado 10 grabaciones una por cada uno de los puntos que aparecen numerados en la Imagen 1.




***Imagen 1:*** *Vista aérea de Herreruela con los puntos de grabación numerados del 1 al 10.*

Una vez realizadas las grabaciones, NoiseBook realiza el análisis mostrando en su pantalla: el sonograma (evolución de los niveles en función del tiempo de grabación), el espectro en frecuencia de la señal y los parámetros psicoacústicos para dos canales de grabación (izquierdo y derecho): nivel de presión sonora en dB y en dBA, la sonoridad promedio y máxima, y la agudeza promedio y máxima.

2.2.-) Cuestionarios:

Para obtener datos sobre la percepción del paisaje sonoro presente en el entorno, se han realizado una serie de encuestas a diferentes personas. Las encuestas fueron rellenadas por vecinos o personas que viven o pasan a menudo por el entorno del punto de grabación. Se encuestaron a cinco personas por punto, lo que hacen un total de cincuenta encuestas para toda la población. A estos encuestados los denominaremos “in situ”.

La encuesta utilizada se compone de diferentes apartados: **a) Presentación:** se indican datos sobre el organismo responsable de la encuesta y el proyecto en el que se encuadra. **b) Control y ubicación:** esta sección se suele rellenar por el encuestador, para tener un orden y un control geográfico y temporal de las encuestas. **c) Percepción del paisaje sonoro urbano:** en esta sección existen cinco cuestiones para valorar del 0 al 10, siendo 0 una valoración “muy mala” y 10 “muy buena”. Las dos primeras cuestiones: impresión general y confort acústico, son sobre el paisaje sonoro y las otras tres: entorno visual, luz ambiental y olores, valoran otros contextos del entorno, para el estudio de la relación que tienen las sensaciones percibidas por el resto de los sentidos con las percibidas por el oído. **d) Marcas sonoras:** se pide al encuestado que enumere y describa las fuentes de sonido que percibe. **e) Diferencias semánticas:** en este apartado se realiza una descripción del paisaje sonoro por medio de 26 adjetivos que aparecen por pares enfrentados en una tabla y una valoración en una escala

bipolar de siete puntos. Por ejemplo, con el par de adjetivos agradable/desagradable, la escala de repuestas sería la siguiente: *1: Muy agradable, 2: Bastante agradable, 3: Un poco agradable, 4: Ni agradable ni desagradable, 5: Un poco desagradable, 6: Bastante desagradable, 7: Muy desagradable*. Los pares de adjetivos son: *agradable/desagradable, confortable/inconfortable, cómodo/molesto, silencioso/ruidoso, relajante/estresante, natural/artificial, diferente/usual, estable/inestable, pulsante/no pulsante, seco/reverberante, cálido/frío, estrecho/ancho, interesante/aburrido.* **f) Información individual:** esta última sección sirve para tener un registro demográfico, género, edad, estado civil y situación laboral; un control del estado de salud y de ánimo del encuestado, así como conocer su sensibilidad y tolerancia a los sonidos.

3) Audiciones y encuestas a voluntarios externos a la población de Herreruela.

En esta fase del estudio se les ha pedido a cinco voluntarios que realicen un ejercicio de abstracción, y valoren la misma encuesta arriba detallada, en todos los aspectos, incluidos los no puramente acústicos, únicamente a partir de las audiciones realizadas en cada punto. De esta manera, a cinco voluntarios, que no conocen la población de Herreruela, se les pide que escuchen, por medio del sistema de reproducción de NoiseBook, las grabaciones realizadas en los distintos puntos. Después de escuchar cada grabación rellenan la encuesta anteriormente descrita, respondiendo a diez en total, una por cada punto de grabación (lo que hace un total de 50 encuestas también). A estos encuestados los denominaremos “ex situ”.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Magnitudes Objetivas Medidas

En la Tabla 1 presentamos el conjunto de magnitudes objetivas medidas en cada posición: L(nivel de presión sonora sin ponderar), $L_A$(nivel de presión sonora ponderada A), $N_{AV}$ (sonoridad promedio), $N_{max}$ (sonoridad máxima), $S_{av}$ (agudeza promedio) y $S_{max}$ (agudeza máxima).

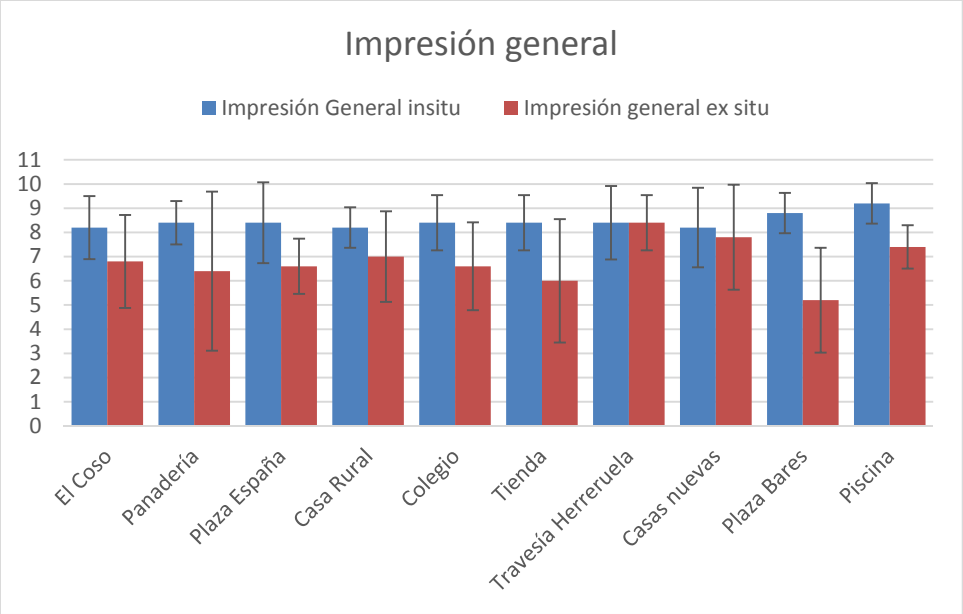
| Magnitud | L[SPL] | $L_A$[SPL] | $N_{av}$ | $N_{max}$ | $S_{av}$ | $S_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Unidades | dB | dB(A) | sonios | sonios | acum | acum |
| *1.-El Coso* | 53,9 | 45,2 | 2,1 | 13,0 | 1,83 | 3,43 |
| 2.-Panadería | 64,7 | 57,0 | 7,2 | 26,7 | 1,80 | 3,03 |
| 3.-Plaza de España | 66,0 | 51,5 | 5,0 | 26,2 | 1,83 | 3,56 |
| 4.-Casa Rural | 53,0 | 48,4 | 3,4 | 15,7 | 1,94 | 3,39 |
| 5.-Colegio | 53,8 | 45,1 | 4,3 | 10,0 | 1,80 | 4,14 |
| 6.-Tienda | 57,7 | 46,8 | 3,8 | 23,6 | 1,63 | 3,13 |
| 7.-Travesía Herreruela | 51,5 | 45,9 | 3,3 | 12,8 | 2,09 | 3,97 |
| 8.-Casas nuevas | 61,2 | 58,0 | 2,6 | 48,5 | 2,12 | 4,51 |
| 9.-Plaza Bares | 67,9 | 60,9 | 10,2 | 37,8 | 1,58 | 3,10 |
| 10.-Piscina | 51,1 | 41,8 | 2,1 | 14,8 | 2,15 | 3,95 |
| PROMEDIO | 58,1 | 50,0 | 4,4 | 22,9 | 1,88 | 3,62 |
| DESVIACIÓN | 6,4 | 6,5 | 2,5 | 12,4 | 0,20 | 0,50 |

***Tabla 1:*** *Magnitudes objetivas obtenidas para los 10 puntos de grabación.*
*Fondo rojo indica valor máximo obtenido en esa columna, fondo verde valor mínimo.*

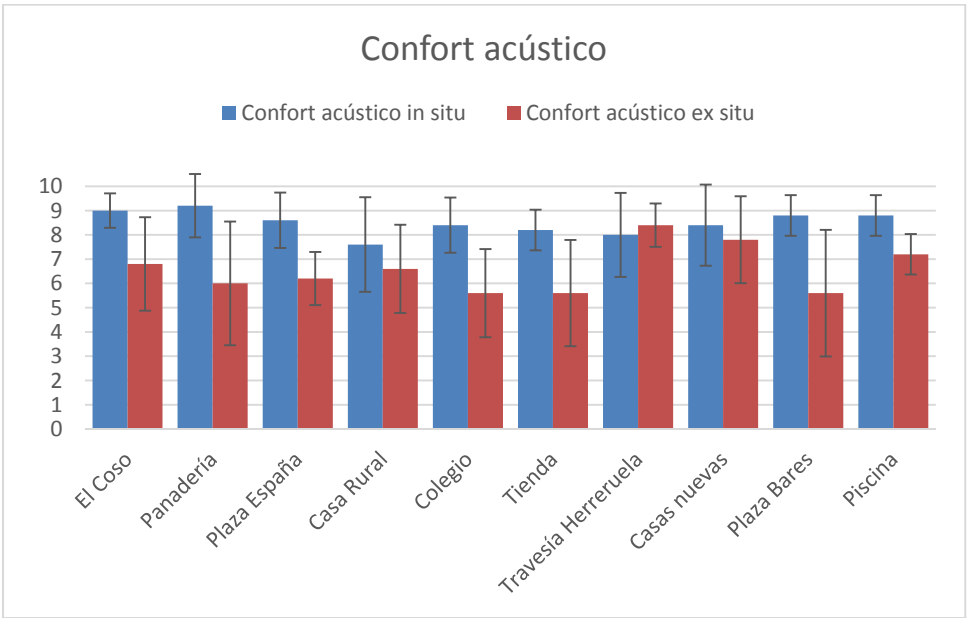
Podemos observar en la Tabla 1 que se trata en general de un pueblo tranquilo, en donde prácticamente no se superan los 60 dBA establecidos por la normativa extremeña sobre el ruido en calle, en horario diurno [5], exceptuando el valor de 60,9 medido en la Plaza de los Bares. Además los resultados son del mismo orden que otras medidas previas realizadas en pueblos extremeños [6-7]

**Resultados de la Encuesta para Aspectos Generales para Oyentes In Situ y Ex Situ**

En las Gráficas 1 y 2 pueden verse las valoraciones de cero a diez (con su desviación típica) que los oyentes, tanto habitantes de la población (in situ), como personas ajenas sometidas a las diez audiciones (ex situ) dan a los aspectos de "Impresión general" y "Confort acústico".




***Gráfica 1:*** *Valoración de 0 (mínimo) a 10 (máximo) para oyentes autóctonos a la población y oyentes externos, en el aspecto de "Impresión general".*




***Gráfica 2:*** *Valoración de 0 (mínimo) a 10 (máximo) para oyentes autóctonos a la población y oyentes externos, en el aspecto de "Confort acústico".*

En ambas gráficas podemos observar cómo en general la valoración in situ supera a la ex situ.

La Tabla 2 presenta un resumen de los resultados anteriores promediando todas las valoraciones en todos los puntos de grabación.

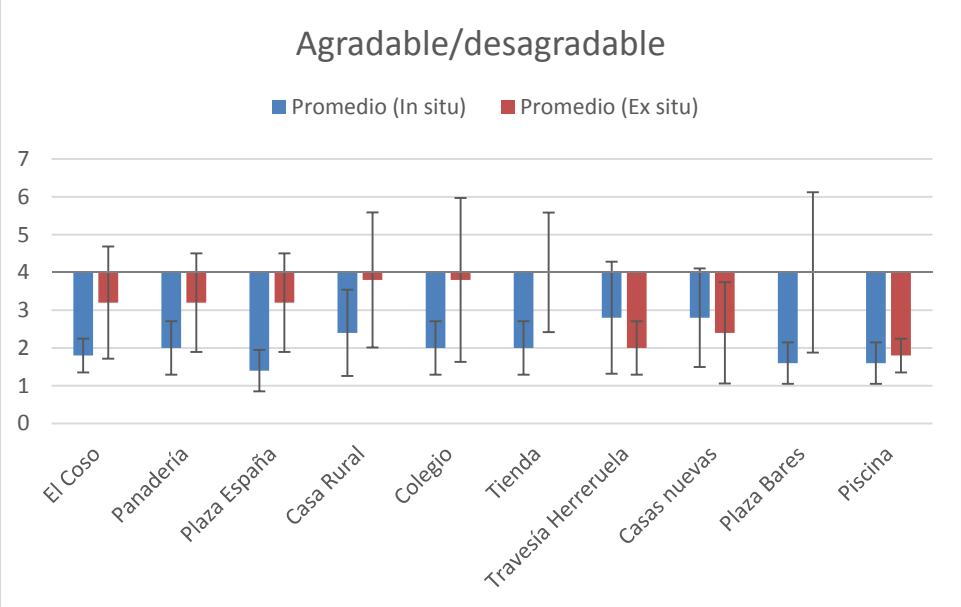
| ASPECTOS GENERALES | Valoración *in situ* | Desviación estándar | Valoración *ex situ* | Desviación estándar |
|---|---|---|---|---|
| IMPRESIÓN GENERAL | 8,5 | 0,3 | 6,8 | 0,9 |
| CONFORT ACÚSTICO | 8,5 | 0,5 | 6,6 | 1,0 |
| ENTORNO VISUAL | 7,8 | 0,9 | 7,0 | 0,6 |
| LUZ AMBIENTAL | 7,9 | 1,3 | 7,0 | 0,5 |
| OLORES | 7,1 | 0,7 | 6,5 | 0,7 |
| PROMEDIO TOTAL | 8,0 | 0,7 | 6,8 | 0,7 |

***Tabla 2:*** *Resultados generales promedio de todos los puntos de grabación (oyentes in situ) y de todas las audiciones (oyentes ex situ), junto con sus desviaciones típicas. (0 valoración mínima, 10 valoración máxima).*

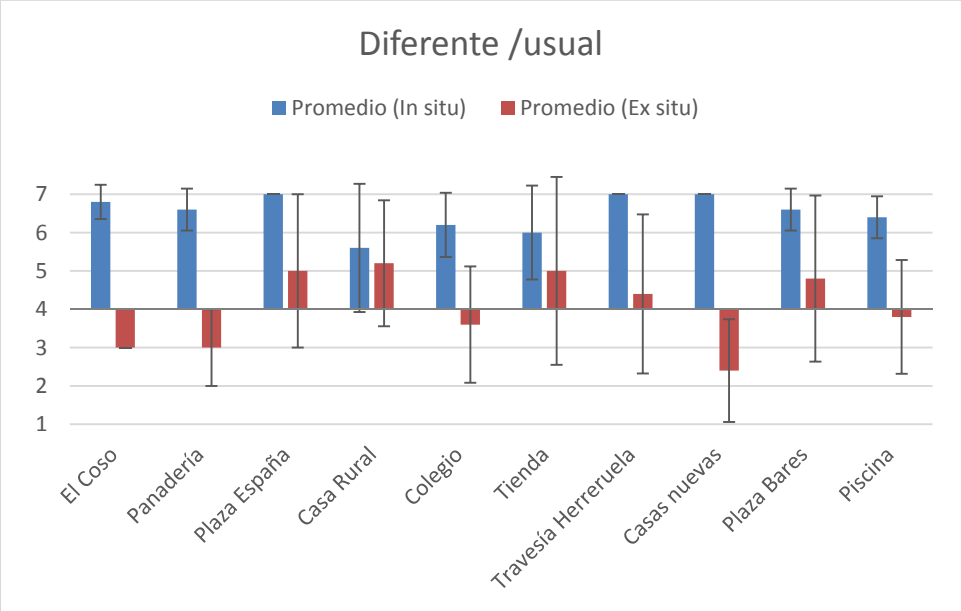
Parece claro que la valoración de los oyentes ex situ, que sólo disponen de la información auditiva del punto de grabación, queda por debajo de la puntuación de los oyentes in situ o habitantes del pueblo, que poseen no sólo la información auditiva, sino información visual, olfativa, experiencias, recuerdos y emociones respecto a los sitios de grabación, etc. Recordemos que a los oyentes ex situ, les estamos pidiendo un ejercicio de abstracción e imaginación, valorando aspectos que no son acústicos a partir únicamente de las audiciones.

**Resultados de la Encuesta para Aspectos Acústicos para Oyentes In Situ y Ex Situ**

En las Gráficas 3 y 4 se presenta la valoración que hacen los oyentes por pares de adjetivos, como ya indicábamos en la metodología experimental, para los sonidos que escuchan in situ los habitantes y los que escuchan por medio de audiciones las personas que no conocen la población (ex situ).




***Gráfica 3:*** *Valoración de los oyentes para el par de adjetivos agradable/desagradable, en donde 1 significa el máximo de agradable, 4 es el valor neutro, y 7 el máximo de desagradable.*




***Gráfica 4:*** *Valoración de los oyentes para el par de adjetivos agradable/desagradable, en donde 1 significa el máximo de en el adjetivo diferente, 4 es el valor neutro, y 7 el máximo en el adjetivo usual.*

De nuevo podemos observar como los habitantes autóctonos dan valoraciones más elevadas (en uno u otro sentido) que aquellos que desconocen la población. Esto podemos verlo en las Gráficas 3 y 4.

**Detección de Fuentes Sonoras por parte de los Oyentes**

En la Tabla 2 hemos recopilado todas las fuentes marcadas por todos los oyentes en cada posición y para cada grabación, se indica el número de fuentes detectadas y el porcentaje de oyentes que la detectan.

| Fuentes detectadas por los oyentes | In situ | | Ex situ | |
|---|---|---|---|---|
| | Nº veces | Porcentaje | Nº veces | Porcentaje |
| Personas | 35 | 70% | 48 | 96% |
| Animales no domésticos | 35 | 70% | 37 | 74% |
| Animales domésticos | 30 | 60% | 29 | 58% |
| Vehículos | 39 | 78% | 26 | 52% |
| Ruido interior viviendas | 7 | 14% | 14 | 28% |
| Viento | 1 | 2% | 4 | 8% |
| Aviones | 1 | 2% | 0 | 0% |
| Otros | 0 | 0% | 12 | 24% |

***Tabla 2:*** *Número de fuentes detectadas por cada tipo de oyente en todos los puntos de grabación, y porcentaje de personas que las detectan.*

Sorprendentemente a todo lo anterior, parece que son los oyentes que escuchan las grabaciones (ex situ) los que en general detectan mayor número de fuentes sonoras, y en mayor porcentaje.

## CONCLUSIONES

Vamos a mencionar algunas posibles conclusiones de los apartados de resultados:

**Magnitudes Objetivas Medidas:** Los resultados obtenidos para los niveles sonoros y las magnitudes psicoacústicas medidas nos muestran valores correspondientes a un entorno acústico tranquilo.

**Resultados de la Encuesta para Aspectos Generales para Oyentes In Situ y Ex Situ:** Puesto que los oyentes ex situ, sólo poseen la información auditiva, y por lo tanto menos información que los habitantes de la localidad, dan valoraciones más bajas que los encuestados locales.

**Resultados de la Encuesta para Aspectos Acústicos para Oyentes In Situ y Ex Situ:** Parece confirmar la conclusión anterior, de manera que los oyentes ex situ dan puntuaciones más intermedias que los in situ, los cuales tienden más a los extremos.

**Detección de Fuentes Sonoras por parte de los Oyentes:** Curiosamente los oyentes ex situ parecen detectar sólo con la audición mayor número de fuentes y en mayor porcentaje. ¿Quizás el aislamiento de la audición les permite una mayor concentración a los oyentes ex situ? ¿Quizás la cotidianidad o rutina les hace perder atención a los habitantes in situ?

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).




## BIBLIOGRAFÍA

[1] Schafer R.M. The new soundscape. A Handbook for the Modern Music Teacher. 1969. Berandol Music Limited, Ontario. Associated Music Publishers, Inc, New York.
[2] Schafer R.M. The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. 1977. Editorial Inner Traditions. Edición 1994.
[3] Truax, B. "Handbook for acoustic ecology". 1978. World Soundscape Project, Simon Fraser University, ARC Publications. Segunda Edición 1999.
[4] UNE-*ISO 1996*-1:2005 Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación. UNE-*ISO 1996*-2:2009 Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental.
[5] DECRETO 19/1997, Reglamentación de Ruidos y Vibraciones, Junta de Extremadura, DOE nº 18, de 11 de febrero de 1997.
[6] Juan Miguel Barrigón Morillas, et al. "Caracterización del paisaje sonoro rural. Alcántara, un pueblo de la raya extremeña", sesión AAM-5.009, Valladolid, Tecniacústica 2013.
[7] Juan Miguel Barrigón Morillas, et al. "Caracterización del paisaje sonoro rural en la comarca de Campo Arañuelo", sesión AAM-5.009, Murcia, Tecniacústica 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LA SONORIDAD DE LOS ESPACIOS PÚBLICOS. BARCELONA-CIUDAD DE MÉXICO

PACS: 43.50 RQ.189

De Gortari, Jimena[1]; Daumal i Domenèch, Francesc[2].
1 Departamento de Arquitectura-Universidad Iberoamericana Ciudad de México
Prol. Paseo de la Reforma 880, Lomas de Santa Fe
01219 México D.F. México
(52 55) 5950 40 00 ext. 74499
E-mail: jimena.dgortari@ibero.mx
2 Escola Tècnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya
Avenida Diagonal 649
08028 Barcelona. España
(34)934 010 867
E-mail: francesc.daumal@upc.edu

## ABSTRACT

Cities sound and do it all the time. They are usually chaotic sounds and constant. We have become accustomed to that permanent sound, but where are the other sounds? Remake our cities livable involves an integrated management of the sound environment, taking into account all the sounds you hear every day. Listening attentively public spaces will better understand their use, the practices there develop, the possibility of interaction allowed.
In analyzing the public spaces in Barcelona and Mexico City we intended to find those sounds that are pleasant and allow the representation, interaction, promoting certain uses, etc.

Keywords: public space, sounds, character, city, urban design.

## RESUMEN

Las ciudades suenan y lo hacen todo el tiempo. Son sonidos por lo general caóticos y constantes. Nos hemos acostumbrado a ese sonido permanente, pero en ¿Dónde han quedado los otros sonidos? El volver a hacer habitables nuestras ciudades implica una gestión integral del medio sonoro, tomado en cuenta todos los sonidos que se escuchan cotidianamente. El escuchar atentamente los espacios públicos permitirá entender mejor el uso que se hace de ellos, las prácticas que ahí se desarrollan, la posibilidad de interacción que permiten.
Al analizar los espacios públicos en Barcelona y la ciudad de México se pretenden encontrar aquellas sonoridades que resultan agradables y que permiten la representación, la interacción, el fomento de ciertos usos, etc.

Palabras clave: espacio público, sonoridad, carácter, ciudad, diseño urbano.

## SONORIDAD Y ESPACIO PÚBLICO[1]

*La presencia del sonido contribuye al proceso mediante el cual los ambientes se convierten en lugares, imprimiéndoles una atmosfera particular generadora de múltiples y variados sentimientos y sensaciones* (López Barrio, 2000).

Según la Real Academia de la Lengua el concepto de sonoridad (Del lat. sonorĭtas, -ātis), es la *cualidad de sonoro* y/o la *cualidad de la sensación auditiva que permite apreciar la mayor o menor intensidad de los sonidos*. Así podríamos entenderla como el atributo que nos permite ordenar sonidos en una escala de mayor intensidad al de menor intensidad.

Según Domínguez Ruíz (2007) la sonoridad habla de nuestra vida cotidiana, nuestro universo y nuestro mundo social, añade que los sonidos están presentes en el ámbito público y en el ámbito privado. Estos sonidos que nos envuelven de forma permanente son difíciles de identificar la mayoría de las veces ya que las fuentes se encuentran revueltas unas con otras.

En el presente trabajo pretendemos descubrir los sonidos de los espacios públicos. Elegimos estos espacios por ser el lugar dentro de la ciudad en donde se dan las relaciones, se mezclan personalidades, se interactúa con esas sonoridades a las que refiere Domínguez Ruíz.

Son esos espacios a los que Gehl (2009) denomina como el elemento fundamental en la construcción de identidad, como espacio socializante. Son aquellos espacios entre construcciones que resultan cruciales para la ciudad y que para cumplir de forma adecuada con sus funciones es aconsejable que cuenten con una buena acústica en donde las sonoridades puedan hacerse presentes.

La escucha atenta en estos espacios nos permitirá leer el lugar, extraer su vocación, quizás añadir nuevas voces, nos permitirá conocer la esencia sonora del lugar; la necesidad de hacer este trabajo es porque las sonoridades son una de las características intrínsecas de la ciudad; para trabajar de forma adecuada con la ciudad debemos aprender a escucharla.

La importancia de trabajar las sonoridades que habitan los espacios públicos nos permitirá conocer ese sonido que hace de la experiencia vivida algo único e irrepetible. Es por ello que para descubrir estas sonoridades debemos trabajar con las características físicas del espacio –la arquitectura y el urbanismo- pero también con la forma de habitarlo, de interactuar en él, de las actividades que permite o fomenta, etc.

En el presente trabajo explicamos diversos instrumentos de análisis, en la mayoría de los estudiados la herramienta principal es la escucha atenta, que funciona de la misma forma que la de la observación como la trabaja W. H. Whyte (1980) en *The Social Life of Small Urban Spaces* en donde relata los comportamientos de los diferentes actores en los espacios públicos y el cómo estos interactúan entre ellos y con la configuración del espacio.

Consideramos también el papel que juegan los usuarios, Gehl diría que sin ellos – toda la diversidad de usuarios- el espacio público no tiene sentido es por ello que resulta importante recoger las experiencias del lugar a través de los relatos de estos usuarios, cada individuo, grupo y/o cultura escuchamos de diferente forma.

Murray Schafer (1998) constató que cada vez se da más una pérdida progresiva de la identidad acústica de los asentamientos humanos dado que la barrera del ruido que reina en muchos lugares conduce a

[1] El trabajo que aquí se presenta formo parte de la tesis doctoral de la autora. Es un apartado inédito que presenta modificaciones con respecto al original.

la desaparición de las formas sonoras, de la riqueza estética y de la superposición espacial de sonidos de distinta profundidad.

En efecto, antes de que sobreviniera la industrialización y se generalizara el uso del automóvil la ciudad se hallaba estratificada acústicamente en un primer, segundo y tercer plano. Por ejemplo, en el primero se oía la conversación que uno mismo estaba llevando a cabo, en el segundo los pájaros o el artesano de herrajes de la esquina, y en el fondo las campanas o el concierto de gallos del recinto urbano. Estas categorías son retomadas por Gehl (2011) cuando habla de los espacios de sociabilización y cómo estos se ven afectados por los niveles sonoros a los que estamos expuestos.

La mayoría de los estudios que se realizan en la actualidad se han centrado en espacios con niveles de ruido de tráfico denso, o en parques y jardines; así como en el interior de las viviendas; siendo escasas las que contemplan el análisis de otros contextos urbanos como pequeñas calles, plazas, barrios, calles peatonales, etc. (Domingo, Guillen, López Barrio, 2005). Algunos autores contemplan la necesidad de estudiar los espacios exteriores -espacios públicos-; algunos incluso llegan a recomendar estudios similares a los realizados para auditorios, (Kang 2007) contemplando nuevos parámetros conceptualizados para este fin.

Los centros históricos de las ciudades no han sido planificados para soportar la presencia de los miles de vehículos que circulan por sus calles (Rodríguez, 2009), por lo que resulta de interés analizar los cascos históricos y el impacto que ha tenido el crecimiento de las ciudades con el consecuente parque vehicular, así como la implantación de nuevos servicios en los mismos con la salida de las industrias de las ciudades, los nuevos habitantes que han llegado, el uso que se le da al espacio público, etc.

La metodología que se propone permitirá demostrar que el problema del ruido se debe de tratar de una manera particular y no generalizada para cada una de las ciudades que la padecen. Uno de los aspectos relevantes es que se considera que para poder luchar eficazmente contra la contaminación sonora, se debe de conocer el papel y la percepción que tienen de los sonidos los habitantes y visitantes de las ciudades. En este estudio uno de los principales objetivos es el de vincular a los habitantes con el entorno sonoro para modificarlo cuando sea necesario y aprovechar lo que le convenga. Sin olvidar ennoblecerlo cuando valga la pena y apreciarlo cuando nuestra sensibilidad lo desee o lo necesite. También se intenta contribuir a la mejora de la calidad acústica del medio ambiente, siendo este un factor indispensable en la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

“El sonido representa en definitiva, un importante elemento informativo del medio, capaz de expresar unos procesos subyacentes de interés ecológico, psicológico, cultural, etc., por lo que su estudio requiere de un enfoque global e interdisciplinario, debiéndose profundizar en el conocimiento de su interacción con otros estímulos, especialmente con los estímulos visuales” (Carles, 2008).

La aplicación de esta metodología que ya fue probada para la tesis doctoral de la autora dirigida por el coautor; en esta se elaboraron un conjunto de herramientas -cuantitativas y cualitativas - para analizar el entorno sonoro; en el trabajo previo antes mencionado el estudio se llevó a cabo en el barrio Gótico de Barcelona. Esta metodología será de nuevo implementada en Barcelona – 5 años después de hecha la anterior- y en la ciudad de México próximamente. Se buscan espacios con carácter semi peatonal lo cual permitirá que el ruido del tráfico no este omnipresente como pasa con otras zonas de la ciudad.

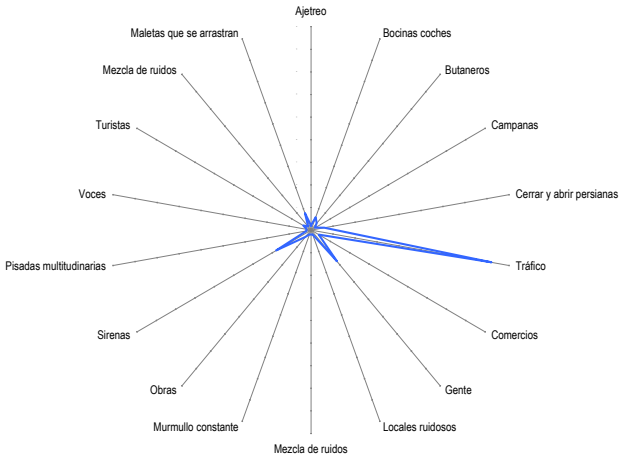



Gráfico 1: Sonoridades del espacio público (elaboración propia)

En el caso del primer estudio los sitios analizados fueron el resultado de un análisis previo de la zona en donde se descartaron algunos por estar muy saturados acústicamente en la mayoría de los casos por el tráfico (Plaza Antoni Maura por ejemplo) o por su poco valor urbano-arquitectónico (Plaza dels Peixos), y también en el que se encontraron espacios no pre-seleccionados que se incluyeron en la lista como es el caso de algunos pasajes (Bacardi, de la Pau).

También es necesario destacar que se analizaron las plazas del barrio, por su carácter de espacio de encuentro, de lugar en el que discurren diversas actividades, en donde el urbanismo y la arquitectura marcan un espacio abierto que resulta de interés para este trabajo.



Fotografía 1: Barcelona – ciudad de México (fotos web)

Para el caso de la ciudad de México se están seleccionando aquellos espacios con características similares a los analizados en Barcelona con la hipótesis de que se puedan encontrar similitudes en sonoridades que podrían relacionarse con la configuración espacial, por mencionar una.

## COLLAGE DE IDEAS METODOLÓGICAS

No existe un modelo universal que estudie los sonidos en las ciudades, actualmente estos estudios se consiguen a través de los mapas de ruido, de capacidades acústicas y de zonificación acústica, que únicamente ejemplifican los niveles sonoros de los diferentes momentos en los que se separa el día para su estudio (Ld, Le, Ln, Lden).

Consideramos que las sonoridades no tienen aún parámetros que las distingan, es por ello que se piensa poner a prueba esta metodología porque se debe contemplar el elemento subjetivo que implica la escucha.

Investigaciones recientes han puesto énfasis en que en el análisis de los espacios públicos con diseño similar deben evaluarse con dos procedimientos simultáneos en el sitio de estudio: preguntar acerca de la percepción que tienen los usuarios sobre el entorno sonoro y en el mismo momento hacer registros así como calcular intensidades. Posteriormente se realiza un análisis estadístico relacionando las respuestas subjetivas con las mediciones acústicas del paisaje sonoro.

La nueva tendencia del estudio del ruido urbano deberá ser la que analiza la comodidad del sitio desde un punto de vista multisensorial, considerando que la información visual y sonora son determinantes en la percepción del ambiente urbano (Carles, et al, 1999, Viollon, et al, 2002, Yang y Kang, 2005, Barrio y Guillén, 2005).

Para este trabajo se tomaron en cuenta las metodologías siguientes para la integración de una propia. A continuación se realiza una breve descripción de las que se utilizaron y/o aconsejan los diferentes organismos, asociaciones, colectivos y expertos en la materia estudiados.

**Carte d'identité sonore**

Amphoux, (1993) explica que se debe elaborar una "carte d'indentité sonore", en la cual se deberán de anotar algunos aspectos al realizar un levantamiento sonoro: en primer lugar convendrá dotarlo de un código y anotar los datos del terreno; posteriormente respecto a los niveles sonoros se deberán de medir los niveles sonoros mínimos y máximos. Asimismo se tienen que realizar entrevistas a los usuarios de los espacios analizados y registrar en 'estas la disposición que tuvieron los encuestados para llevarla a cabo. Será indispensable una breve descripción del fragmento sonoro: el lugar, el tiempo y los elementos audibles.

**Cartas sonoras temáticas**

En Acoucité a través de unas cartas sonoras temáticas se realiza una descripción de los compuestos cualitativos del paisaje sonoro de la zona de estudio. Esta se realiza a través de tres cartas sonoras en donde se reflejan las características ligadas al espacio (tipos, formas, materiales, etc.); las características sonoras (fondo sonoro y señales sonoras) y los análisis transversales (tipos espacio-acústicos y tipos de sociabilidad).

En cuanto a los tipos de espacio acústicos, se trata de los tipos de espacios sonoros remarcables, ya sea por el espacio construido (manzana sonora protegida, filtro acústico urbano, sala acústica urbana, locutorio urbano, revelador de sonidos), sea por el hecho sonoro, cuando los sonidos se instalan en un lugar y lo identifican. Definidos en:

- Esclusa acústica urbana (Sas acostique Urbain): espacio restringido unido por dos grandes espacios y que cuenta con una sonoridad propia.
- Filtro acústico urbano: espacio restringido que filtra los sonidos a través de un pasaje de un lugar a otro.
- Sala acústica urbana (salle acoustique urbaine): espacio reverberante, evocando las propiedades acústicas de una sala de concierto.
- Revelador de suelo (révélateur de sol): lugar en donde el suelo, generalmente de gravilla, permite escuchar de manera significativa los pasos.
- Zona apoderada por un ritmo (Zone Fondée par un rythme): espacio en el cual los sonidos se instalan como presencia audible en el tiempo. Este marcaje temporal puede ser engendrado por un mercado, por comercios, etc.

El fondo sonoro dominante se refiere a los sonidos más representativos, es decir de tipo tecnológico (conjunto de ruidos ligados a un motor), de tipo humano (voces, pasos, lugares, etc.), o de tipo natural (pájaros, agua, viento, etc.). Su intensidad define su grado de permeabilidad: se trata de la capacidad del fondo sonoro dominante para permitir la escucha de otras fuentes sonoras e impermeabilidad cuando enmascara por completo otras fuentes sonoras existentes.

En cuanto a los análisis transversales, se considera que permiten ampliar y categorizar ciertos factores en los mapas de resultados. Así los tipos de sociabilidad permiten representar la capacidad media de un lugar que admite actividades sociales; como por ejemplo: encuentro de personas, actividades de ocio, actividades sociales variadas; que es a los que nos referíamos al inicio de este texto. El éxito del espacio público radica en que estas acciones antes descritas sean posibles.

Esto se traduce en unos planos en donde se perfilan los diferentes aspectos antes explicados así que en:

a) Plano de sociabilidad: quedan señalados los puntos de interacción y encuentros, las actividades sonoras múltiples, las actividades domésticas audibles, los grados de sociabilidad poco significativa y las actividades nocturnas.
b) Plano de fondo sonoro y señales sonoras: se marca el fondo sonoro dominante tecnológicamente permeable, tecnológicamente semi-permeable, tecnológicamente impermeable. Así como las señales sonoras: humanas, naturales e indicativas.
c) Mapa espacio-acústico: los diferentes espacio-acústicos, acústicos urbanos, filtro acústico urbano, sala acústica urbana, zona con ritmo, revelador de suelo.

**Muestras sonoras**

En ACIRENE en el estudio hecho para la “Concepción y Ordenación del paisaje sonoro del sector de la Sucrerie-St. Cosme” se analizan las características del terreno; la ubicación, las vías cercanas, la topografía, los edificios, la vegetación, se registran los puntos de grabación y los límites del sitio a analizar.

Asimismo se hace una investigación del ambiente sonoro inicial del sector a través de la generación de una hipótesis del ambiente sonoro realizado a través de la arquitectura y el urbanismo del sitio, así como por la cantidad de habitantes, del tráfico existente, y también conociendo la historia del sitio y sus transformaciones arquitectónico-urbanísticas a través del tiempo.

A partir de estos se seleccionan los sitios en donde se realizarán los registros sonoros, en estas muestras se toman los siguientes datos:

- Una descripción de las constantes, por ejemplo presencia humana, aves, coches, señales sonoras existentes, etc.
- Se hace un resumen gráfico de las muestras.
- Posteriormente se hace un análisis de las muestras, a partir de la legibilidad, la comunicación, las interferencias, etc.

Para cada uno de estos puntos se elaboran unas fichas de lectura en donde se toman los siguientes datos:

a) La identificación del punto de registro

| | | | |
|---|---|---|---|
| Núm. y punto geográfico | | Clase técnica | |
| Fecha y hora del registro | | Temperatura | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Altimetría | | Velocidad del viento (m/s) | |
| Ruido de fondo, mínimo | | Presión e higrotermia | |
| Ruido de fondo, máximo | | Nubosidad | |

b) El ambiente visual: foto panorámica y cartografía, plano

c) Los objetos sonoros identificados: tabla en donde se encuentran algunos de los sonidos que se podrían encontrar con la idea de identificarlos y reconocerlos.

d) Se realiza un análisis de parámetros sonoros: frecuencia, caracterización paisajística y grado de correlación (identidad del sitio en relación con el sonido), efectos remarcables, legibilidad auditiva, repartición espacial, horizontes auditivos, fuentes sonoras que en el tiempo y el espacio cuentan con una relación entre estabilidad y regularidad, reverberación,

e) Y finalmente se elaboran unos gráficos estadísticos de los sonidos encontrados empleando gráficos tipo radar y gráficos de perfil cognitivo.

**Augouyard**

François Augoyard en su libro “A l’écoute de l’environnement, répertoire des effets sonores” (1995) describe al efecto sonoro para describir acústicamente a la ciudad. Este efecto es un complejo conjunto de factores socioculturales pero también conformados por el espacio construido, por la forma de la ciudad; que permiten modelar a estos sonidos.

La acústica aplicada muestra como el campo, el volumen, la forma, el material, condicionan la propagación de los sonidos. Pero, la zonificación urbana, la trama de las vías, los planos de circulación, la distribución de las actividades socio económicas ofrecen a los ciudadanos otras posibilidades de información sonora o de interpretación perceptiva. Es la combinación entre las capacidades acústicas pasivas y las fuentes o acciones sonoras particulares que producen efectos caracterizados por el medio urbano. En este texto se cuenta con un exhaustivo listado y explicación de los diversos efectos que pueden ocurrir en este medio.

Además contempla que la cartografía del ruido debe evolucionar hacia una representación más general del ambiente-entorno sonoro, la cual deberá de incluir características cualitativas como el tipo de fuente, la ocurrencia, la periodicidad, el tipo de receptor, etc. A partir de los efectos sonoros que él describe se podrán sintetizar una buena parte de los caracteres eficientes de un lugar específico. Sin embargo concluye que falta encontrar las expresiones gráficas adecuadas.

**Caracteres sonoros de Daumal**

F. Daumal (1998) consigue descifrar el comportamiento sonoro de los diferentes espacios para su posterior clasificación y mejor entendimiento. Caracteres basados sin duda en la forma urbana y arquitectónica de los espacios, pero también del sentimiento y sensación que producen. Documento precursor en el sentido de entender el comportamiento del sonido en un medio urbano a partir de la poética sonora. Este texto también cuenta con el dibujo del comportamiento del sonido a partir de numerosos croquis de los diferentes espacios analizados.

**Ideas finales**

Se debe considerar que las sonoridades brindan al espacio público una característica dinámica que le da sentido y que quizás –consideramos – le da la vocación de lugar.

Al contar con registros sonoros podremos ir descubriendo y empalmando las huellas que podrían conformar un enorme mosaico, a semejanza de un plano Nolli pero exclusivo de sonoridades, en donde el espacio público sea ese continuo y en este caso en particular un continuo sonoro (Atienza, 2008).

También nos permite entender la interacción de los usuarios con el espacio de otra manera, no sólo se contempla lo físico y/o tangible sino también se explora ese otro elemento que acontece una única vez, encontraremos con esto descubrir los diferentes sonidos que aparecen y desaparecen en los espacios públicos.

Para cada lugar existen un conjunto de actividades, un acumulado de sonidos de naturaleza particular, y un espacio en el cual estos sonidos se reparten y comparten. Así es como cada lugar es portador de una(s) sonoridad(es) particular(es) (Bruit et formes urbaines, 1981).

Como apunte final a todo lo anterior, es necesario remarcar que un ambiente sonoro urbano es el resultado de múltiples mecanismos superpuestos, los cuales crean la calificación acústica del lugar. El poder encontrar estas características acústicas – sonoridades- de los diferentes espacios públicos y compararlos con otros y otras culturas permitirá una mejor intervención y mantenimiento de los mismos.

**Bibliografía**


ACIRENE, **Etude de conception d'aménagement du paysage sonore du secteur de la Sucrerie – St. Cosme,** phase 01, Résumé de l'étude, novembre 2007.

Acoucité, **Diagnostic Acoustique de Quartier, perception de l'environnement sonore urbaine, site de "Saint Georges** *Lyon 5*, presentación. (No publicado)

Amphoux, Pascal, "Signatures, configurations et effets sonores*"*, **Arch. And Behav**., vol. 9, no. 3, pp. 379-386, 1993.

Augoyard, Jean François, **A l'écoute de l'environnement. Répertoire des effets sonores**, ed. Parenthèses, 1995.

Atienza, Ricardo, **La identité sonore urbaine : Recherche sur l'incorporation critique du concept d'identité sonore dans l'élaboration du projet urbain**, Tesis doctoral en Arquitectura / Urbanismo, UPMF - Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble - Laboratoire CRESSON / UPM-Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Grenoble.

Atkinson, Rowland, "Ecology of Sound: the sonic order of urban space*"*, **Urban Studies**, vol. 44, no. 10, pp. 1905-1917 Septiembre, 2007.

Carles, José Luis y López Barrio, Isabel, "El estudio de paisajes sonoros*"*, **Arbor: ciencia, pensamiento y cultura**, no. 518-519, 1989.

De Gortari, J. 2013. **Guía sonora para una ciudad.** Editorial Juan Pablos-UAM, México.

Domínguez Ruíz, A. 2007. **La sonoridad de la cultura: Cholula, una experiencia sonora de la ciudad**, Fondo de Cultura Económica, México.

Gehl, J.2009. **La humanización del espacio urbano. La vida social entre los edificios**, Editorial Reverté, España.

Hellstrom, Björn "Modelling of Sounds in public spaces*"*, **Conference paper: Sound Practice**, College of Arts, Totnes, England, febrero 2001.

Lynch, Kevin, **La imagen de la ciudad**, 1998.

Kang, Jian, **Urban Sound environment**, ed. Taylor and Francis, 2007.

López Barrio, Isabel," Medio ambiente sonoro y su valoración subjetiva", **Física y sociedad**, Num. 11, 2000.

Semidor, Catherine y Gibiat, Vincent, **Escuchando los espacios sonoros (listening to sound spaces),** Tecniacústica Bilbao, 2003.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# NUEVAS FORMAS DE COLOCACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

PACS 43.55.RG

Penélope González de la Peña
URSA Ibérica Aislantes, S.A.
Ctra. Vilarodona, km 6,7
43810 El Pla de Santa María (Tarragona)
España
Tel: +34 680 457 650
E-mail: penelope.gonzalez@ursa.com

## ABSTRACT

The acoustic insulation systems with mineral wool, present different obstacles to a correct installation, this problems can produce “acoustic bridges” that make weak the insulation with the consequent drop in the “in situ” measurement and the no conformity with the acoustic insulation in project.
There have been acoustic test in laboratory with different installation forms in order to see the differences between the traditional mechanical fixings and a new system composed by an acoustic membrane that fix the mineral wool.

The analysis has been in ventilated façades and in ceilings.

## RESUMEN

Los sistemas de aislamiento acústico con lana mineral, tienen una serie de inconvenientes a la hora de su colocación que hacen que se puedan producir puentes acústicos que lo debiliten haciendo que en una comprobación “in situ” el aislamiento conseguido sea inferior al calculado en proyecto. Para ello, se han realizado diferentes ensayos con diferentes formas de sujeción del aislante para, por un lado ver la ganancia que se obtiene con nuevos sistemas de fijación y por otro, las ventajas en la colocación de los mismos.
Se analizarán soluciones tanto de paredes exteriores como de interiores, así como falsos techos.

# NUEVAS FORMAS DE COLOCACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

En muchas ocasiones, nos encontramos con materiales aislantes, como las lanas minerales, que en los ensayos acústicos que ofrecen dan unos resultados, pero que luego, cuando trasladamos esos resultados a la realidad, se producen bajadas de aislamiento.

Parte de esta bajada de aislamiento del ensayo en laboratorio al ensayo “in situ” viene producida por el cambio en las condiciones de contorno entre los diferentes ensayos. Mientras que en un ensayo de laboratorio, no existen trasmisiones laterales y las medidas de las salas y la reverberación están estandarizadas, en las medidas “in situ” si tenemos esas transmisiones por flancos además de una diferencia de medidas entre sala emisora y receptora, así como de tiempo de reverberación. Estas bajadas de aislamiento son normales y cuando se realiza el proyecto de aislamiento acústico ya se tienen en cuenta.

Sin embargo, existen otras razones para que se produzca un descenso en el aislamiento acústico de los sistemas, como son los defectos de instalación. Estos, no son predecibles por el proyectista, ya que dependen del instalador, y son difícilmente mesurables.

Para intentar que estos defectos de instalación sean mínimos, se debe intentar ir a sistemas de colocación lo más sencillos posibles para el instalador, donde se cuiden al máximo los materiales acústicos y las posibilidades de degradación sean menores.

Estudiaremos diferentes sistemas de fijación en fachadas ventiladas y falsos techos.

**Sistemas de fijación tradicionales.**

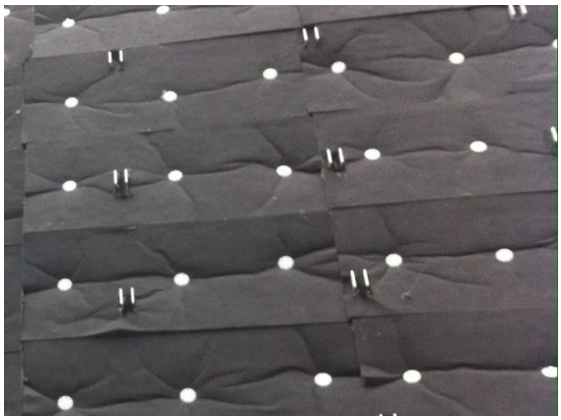
Los sistemas de fijación tradicionales se realizan mediante fijaciones mecánicas tipo “roseta” que se colocan en los paneles de lana mineral



Fijación mecánica.

Estos sistemas tienen un problema a la hora de su instalación, el instalador debe ser muy cuidadoso para introducir toda la espiga y que la fijación al soporte sea la correcta, pero a la vez no debe aplastar la lana mineral, ya que se produce en el lugar de la fijación una pérdida de espesor que puede causar un detrimento acústico (además de térmico en las aplicaciones donde sea necesario), así como una rotura del material o del revestimiento que lleve.

En las siguientes fotografías se puede observar estos defectos de ejecución:

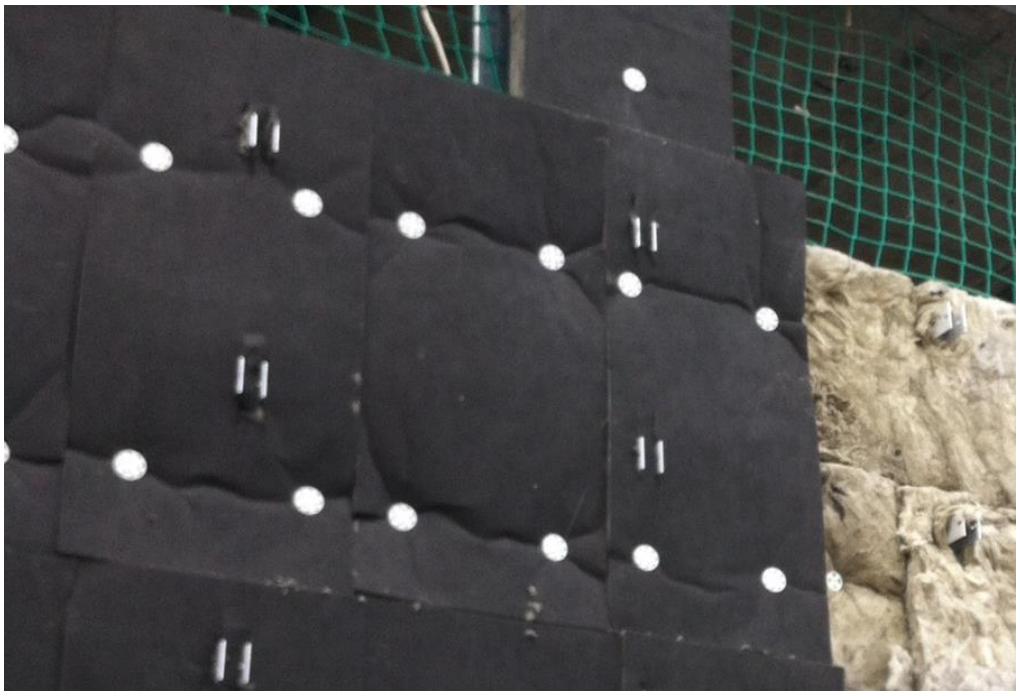


Fijaciones demasiado apretadas



Fijaciones que han roto el revestimiento de la lana

En otras ocasiones, es necesario colocar varias capas de aislamiento para conseguir los requerimientos que el proyecto necesita; en estos casos, se une el problema de tener que realizar dos fijaciones, una por cada capa, y que la fijación del segundo panel debe ser más larga de lo que habitualmente se encuentra en el mercado, y por tanto, más costosa para el instalador.



Dos capas de aislamiento acústico de lana mineral con fijaciones mecánicas

Además, la forma de unión de la lana mineral al soporte base, se realiza mediante fijaciones rígidas, con lo cual no ayudamos al efecto amortiguador que tienen las lanas con la onda acústica, que es lo que va a hacer que sea un aislante acústico en los elementos constructivos donde se incorpora.

**Sistemas de fijación con membranas acústicas.**

La membrana acústica con la que vamos a fijar la lana mineral es un elastómero acrílico en estado líquido con base acuosa que, una vez aplicado sobre un sustrato vertical u horizontal y tras un proceso de reticulación, forma una película continua y adherente de elevada elasticidad que permite absorber las dilataciones y contracciones de los soportes evitando grietas y fisuraciones y sirviendo de soporte para la lana mineral.

Esta membrana realizada “in situ” mejora el aislamiento acústico al bajar la frecuencia de resonancia por debajo del rango audible, siendo muy eficaz en la atenuación a bajas frecuencias y en el rango crítico de 2.500 Hz, por lo que complementa el aislamiento acústico que proporciona la lana mineral.

La instalación se realiza con un proyectado de la membrana, que tiene un tiempo abierto de 30’ aproximadamente (depende de las condiciones de temperatura y humedad del entorno); sobre el elastómero, se colocan los paneles de lana mineral que proporcionarán el aislamiento térmico y acústico del sistema constructivo donde se realice el sistema.
Los paneles quedan sujetos al soporte por simple presión sobre el elastómero, tanto en aplicaciones verticales como en aplicaciones horizontales.





Montaje Fachada Ventilada SONEC Titanium + URSA TERRA Vento Plus





Montaje Falso Techo SONEC Acoustic + URSA TERRA Vento Plus

Dependiendo de si el sistema de aislamiento es por el exterior (fachada ventilada) o por el interior (doble panel de lana mineral en interiores) la membrana es de diferentes tipos para ajustarse a las necesidades de cada uno de los sistemas: exposición a la intemperie, absorción de agua…

También la lana mineral llevará diferentes revestimientos dependiendo de la solución constructiva que se plantee

Ventajas del sistema

En este caso no hay fijaciones mecánicas que rompan la lana ni la aplasten, por lo que no se producen puentes acústicos por mermas en la lana mineral
El elastómero proyectado ayuda al aislamiento acústico al crear una membrana continua de elevada elasticidad haciendo una fijación de la lana mineral no rígida.
En el caso de que se necesiten varias capas de lana mineral, se pueden unir las diferentes capas con el elastómero de tal forma que no es necesaria una fijación especial, quedando el aislamiento totalmente uniforme.





**Ensayos acústicos Sistema de Fachada Ventilada.**

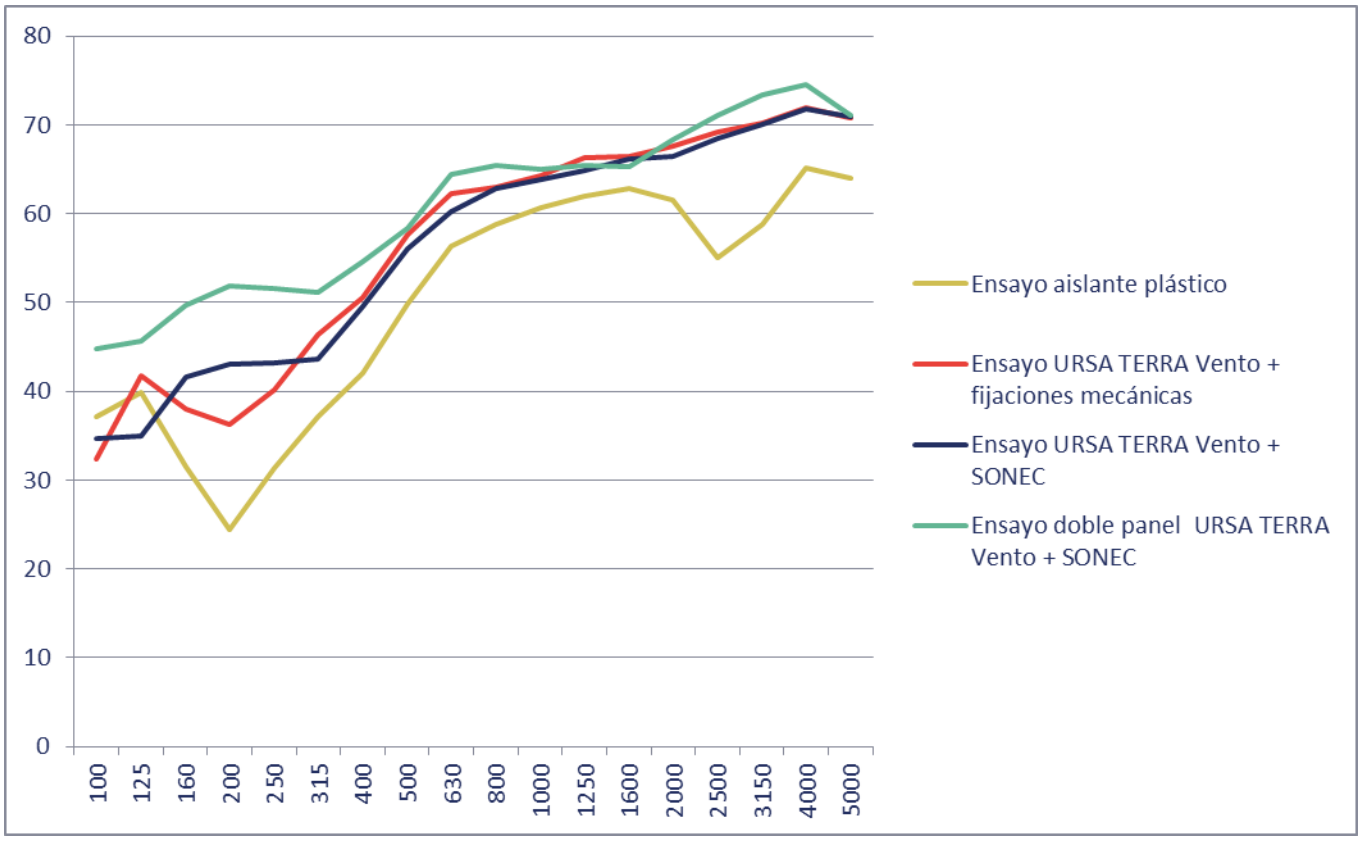
Los ensayos acústicos realizados en laboratorio entre los diferentes sistemas de aislamiento dan los siguientes resultados:

Los valores globales de los diferentes ensayos son los siguientes:

| Sistema constructivo | Rw (dB) | RA (dBA) | RAtr (dBA) |
|---|---|---|---|
| Ensayo fachada ventilada con aislante plástico | 46,6 (-4;-8) | 43,8 | 38,5 |
| Ensayo fachada ventilada con lana mineral URSA TERRA Vento 80 mm y fijaciones mecánicas | 54,9 (-3;-8) | 53,2 | 47,1 |
| Ensayo fachada ventilada con lana mineral URSA TERRA Vento 80 mm fijada con SONEC | 56 (-2;-7) | 54,7 | 48,8 |
| Ensayo fachada ventilada con dos paneles URSA TERRA Vento de espesor total 160 mm con SONEC | 63 (-2;-6) | 61,7 | 57,2 |

Los valores de los ensayos completos serían:

| Frecuencia | Ensayo aislante plástico | Ensayo URSA TERRA Vento + fijaciones mecánicas | Ensayo URSA TERRA Vento + SONEC | Ensayo doble panel URSA TERRA Vento + SONEC |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 37,1 | 32,3 | 34,7 | 44,8 |
| 125 | 39,9 | 41,7 | 35 | 45,7 |
| 160 | 31,5 | 38 | 41,6 | 49,7 |
| 200 | 24,4 | 36,3 | 43,1 | 51,8 |
| 250 | 31,3 | 40,2 | 43,2 | 51,5 |
| 315 | 37,1 | 46,4 | 43,6 | 51,2 |
| 400 | 42,1 | 50,6 | 49,6 | 54,6 |
| 500 | 49,8 | 57,6 | 56 | 58,4 |
| 630 | 56,3 | 62,2 | 60,2 | 64,4 |
| 800 | 58,8 | 63 | 62,9 | 65,5 |
| 1000 | 60,7 | 64,3 | 63,9 | 65 |
| 1250 | 61,9 | 66,3 | 64,8 | 65,5 |
| 1600 | 62,8 | 66,4 | 66,1 | 65,3 |
| 2000 | 61,6 | 67,6 | 66,4 | 68,3 |
| 2500 | 55 | 69,2 | 68,5 | 71,1 |
| 3150 | 58,8 | 70,2 | 70,1 | 73,4 |
| 4000 | 65,2 | 71,9 | 71,8 | 74,5 |
| 5000 | 64 | 70,8 | 70,9 | 71,1 |



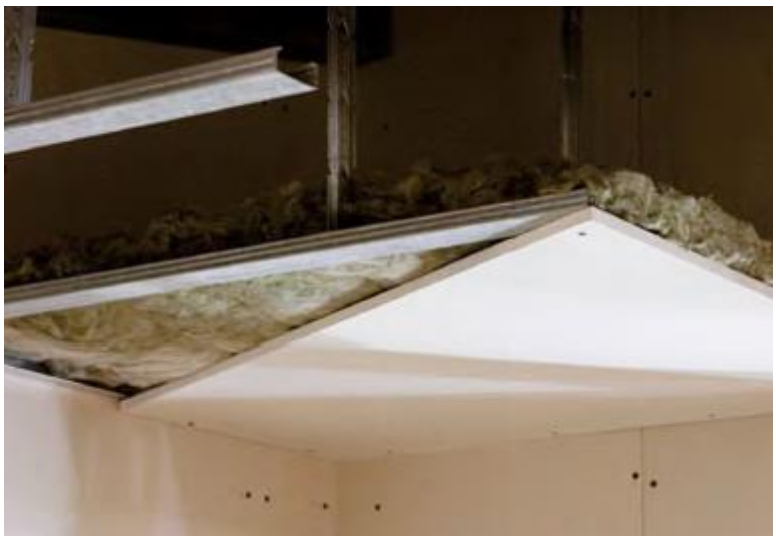
**Conclusiones**

Se puede observar que los productos de lana mineral URSA TERRA Vento colocados con el sistema de fijación SONEC dan mejores resultados de aislamiento acústico en laboratorio.

Si a esto le sumamos que durante la ejecución en obra del sistema, los defectos que hemos observado que se producen con las fijaciones mecánicas tradicionales no se van a presentar por lo que no se producirán (o se producirán en menor medida), pérdidas de aislamiento debidas una ejecución incorrecta.

**Ensayos acústicos Falsos techos y Paramentos horizontales.**

Tradicionalmente, la forma de colocación de las lanas minerales en los falsos techos consiste en instalar los paneles o las mantas directamente sobre la terminación del falso techo, dejando un plenum entre la lana y el forjado que variará dependiendo de las posibilidades que se tengan en obra de bajar el falso techo (altura entre forjados).



Panel URSA TERRA colocado encima de placa de yeso laminado con estructura suspendida de forjado

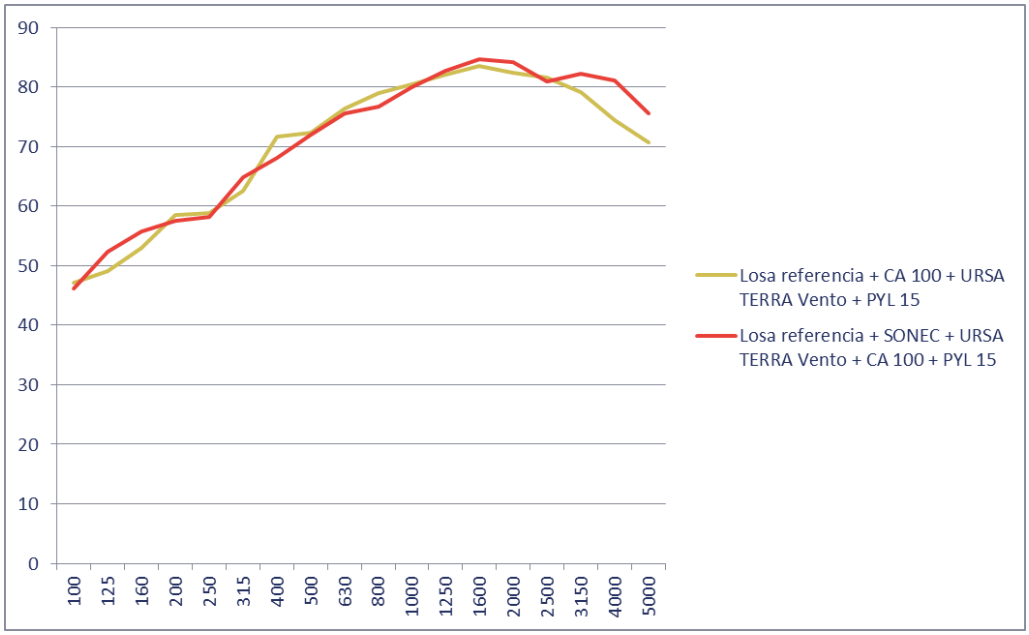
Si bien este sistema es el óptimo desde un punto de vista acústico, ya que los valores de ensayo dan mejores prestaciones, en ocasiones se tiene el problema en obra de que el falso techo lleva instalaciones, luminarias etc, que o bien aplastan la lana con su peso o bien la rompen, como es el caso de las luminarias, para su colocación.
Esto supone que tendremos también “puentes acústicos” en el sistema que debilitarán la comprobación “in situ” del mismo.

Una solución, es fijar mediante el elastómero la lana mineral al forjado, dejando en este caso el plenum por debajo de la lana y colocando después la terminación del sistema de falso techo.

Los valores de ensayo serán los siguientes:

| Sistema constructivo | Rw (dB) | RA (dBA) |
|---|---|---|
| Losa referencia + CA 100 mm + URSA TERRA Vento + PYL 15 mm | 71 (-2;-8) | 69,4 |
| Losa referencia + SONEC + URSA TERRA Vento + CA 100 mm + PYL 15 mm | 67 (-3;-9) | 64 |

| Frecuencia | Losa referencia + CA 100 + URSA TERRA Vento + PYL 15 | Losa referencia + SONEC + URSA TERRA Vento + CA 100 + PYL 15 |
|---|---|---|
| 100 | 47,1 | 46,1 |
| 125 | 49,1 | 52,4 |
| 160 | 53 | 55,7 |
| 200 | 58,5 | 57,5 |
| 250 | 58,9 | 58,2 |
| 315 | 62,5 | 64,9 |
| 400 | 71,7 | 68,1 |
| 500 | 72,3 | 72 |
| 630 | 76,4 | 75,6 |
| 800 | 78,9 | 76,7 |
| 1000 | 80,4 | 80 |
| 1250 | 82,1 | 82,7 |
| 1600 | 83,5 | 84,7 |
| 2000 | 82,4 | 84,1 |
| 2500 | 81,5 | 80,9 |
| 3150 | 79,1 | 82,3 |
| 4000 | 74,5 | 81,1 |
| 5000 | 70,7 | 75,5 |




## Conclusiones

Podemos ver en los gráficos, que, pese a que tenemos una pequeña bajada de aislamiento en la solución de la colocación con el elastómero debido al cambio de posición de la lana mineral, en este caso, las posibilidades de una incorrecta instalación son menores, por lo que las probabilidades de sufrir una bajada de aislamiento por defectos de ejecución en obra son menores también.

El elastómero además ayuda a que la lana mineral quede fijada con una sujeción no rígida que mejora el aislamiento acústico.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ALVENARIA DE BLOCOS CERÂMICOS COM PLACAS DE GESSO ACARTONADO: ESTUDO COMPARATIVO DE ISOLAMENTO ACÚSTICO

PACS: 43.55.TI

Sérgio Klipell Filho[1]; Josiane Reschke Pires[1]; Maria Fernanda de O. Nunes[1]
[1.] Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt PERFORMANCE UNISINOS, Av. Unisinos, 950, CEP 93022-000 – São Leopoldo – RS – Brasil.

## ABSTRACT

This study aims to analyze the acoustic insulation of walls systems with masonry ceramic hollow bricks and gypsum boards on diverse types of installations. The laboratory tests were conducted on a masonry wall with nine different systems and mountings of gypsum boards, with two different densities and it was also evaluated the acoustic insulation of this masonry wall with mortar coating with thickness of 3 cm, on both sides. The results showed that the use of bonded plates is insulated bottom towed to the masonry and that mixed systems can increase $R_w$ by up 7 dB.

**Keywords:** Masonry wall, sound insulation, gypsum board.

## RESUMO

O objetivo deste artigo é analisar o isolamento acústico de paredes compostas por alvenaria de blocos cerâmicos vazados e placas de gesso em diferentes tipos de composições. Os ensaios foram realizados em laboratório em parede de alvenaria revestida com 9 composições com placas de gesso acartonado, de 2 densidades superficiais distintas, além de revestimento de argamassa de 3 cm de espessura em ambas as faces. Os resultados mostraram que em comparação à alvenaria rebocada, a utilização de placas coladas tem isolamento acústico inferior e que os sistemas mistos podem aumentar o $R_W$ em até 7 dB.

**Palavras chave:** Parede de alvenaria, isolamento acústico, gesso acartonado.

## 1. INTRODUÇÃO

Usualmente, os fechamentos verticais em edifícios habitacionais brasileiros são confeccionados com alvenaria de blocos cerâmicos vazados que, apesar de atenderem a níveis mínimos de desempenho acústico, não são suficientes para atender aos níveis para classificação superior. Parte dessa situação se deve ao fato de que o aumento da massa nas alvenarias muitas vezes não é viável na prática em função das cargas na estrutura, assim para atingir índice de isolamento acústico maior necessita-se de materiais leves, para compor um conjunto mais eficiente com a alvenaria.

A grande diversidade de blocos acarreta a elevada demanda por ensaios de perda de transmissão sonora para sistemas de vedações verticais em alvenaria e, aliado a essa realidade, atualmente se verifica também diversidade nos tipos de revestimentos utilizados nessas alvenarias. Nas alvenarias com blocos vazados, a fragilidade acústica é maior, em comparação aos blocos maciços, pois os furos dos blocos reduzem a massa superficial e aumentam a ressonância do sistema.

Nesse sentido, alguns estudos têm sido conduzidos para avaliar a perda da transmissão sonora em alvenarias no contexto regional de uso na construção civil, nos quais são analisadas as formas de conexão da alvenaria com as estruturas e a consequente transmissão pelos flancos [1], a instalação de placas leves [2] e a perda de transmissão sonora em diferentes tipos de blocos vazados.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar o isolamento acústico de paredes compostas por alvenaria de blocos cerâmicos vazados produzidos na região sul do Brasil com placas de gesso em diferentes tipos de composições.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

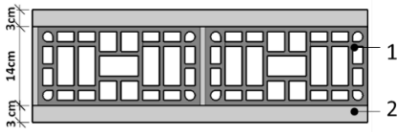
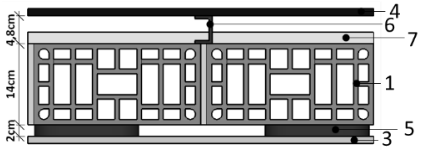
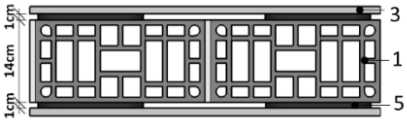
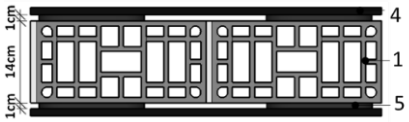
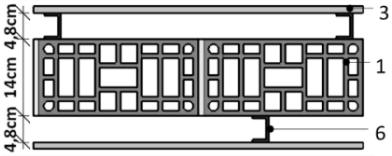
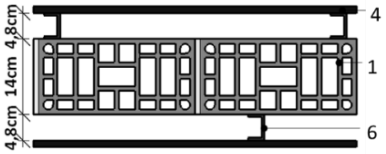
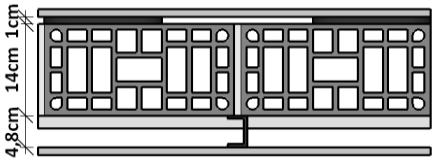
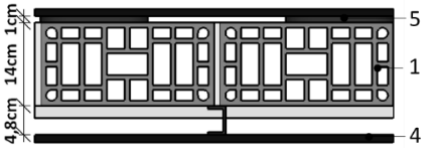
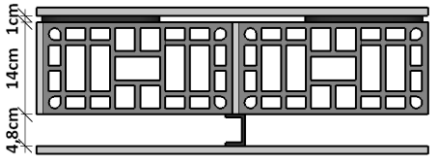
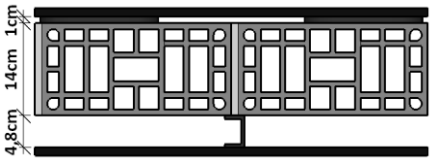
Os ensaios foram realizados em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos vazados, com dimensões de 14 x 19 x 29 cm e Fbk de 7 MPa, com diferentes composições de revestimentos com placas de gesso acartonado. Foram utilizados dois tipos de placas de gesso acartonado com diferentes densidades superficiais, com 8,5 kg/m² e 12,0 kg/m², ambas com 12,5 mm de espessura. Para as análises comparativas também foi realizado ensaio na mesma parede com revestimento de argamassa em ambas as faces, com 3 cm de espessura.

A instalação das placas nas superfícies da alvenaria foi realizada com perfis metálicos e com adesivo específico para o sistema. No sistema com a utilização do adesivo, as placas de gesso foram coladas na parede de alvenaria com quatro pontos de fixação e espessura final de adesivo de 10 mm. No sistema com perfis metálicos foram utilizados perfis tipo U 48/30 e as amostras foram testadas sem preenchimento da cavidade e com preenchimento com lã de vidro de espessura de 2 cm e densidade de 20 kg/m³.

Os ensaios foram realizados em laboratório, em câmaras reverberantes para determinação da perda de transmissão sonora ao ruído aéreo, conforme os procedimentos das normas ISO 10140-2:2010 [3] e ISO 10140-5:2010 [4], nas bandas de 1/3 de oitava entre 100 e 5.000 Hz. Os equipamentos utilizados foram: analisador sonoro B&K 2270, fonte omnipower B&K 4292-L, calibrador portátil B&K 4231 e amplificador de potência B&K 2734.

A Tabela 1 apresenta a composição dos sistemas de paredes e a respectiva denominação adotada neste trabalho. Para a identificação do tipo de placa foi utilizada as legendas “P” para as placas com maior densidade superficial e “S” para as placas de menor densidade superficial. A instalação com placas coladas recebeu a letra “C” e para as instalações com guias metálicas a referência foi feita para os casos sem lã de vidro “SL” e com lã de vidro “CL”. A parede de alvenaria com reboco convencional foi denominada de “A” e a parede que utilizou dois os sistemas de fixação e os dois tipos de placas “PS”.

**Tabela 1 – Composições adotadas no trabalho**

| | |
|---|---|
| **A**<br>  | **PS**<br>  |
| **PC**<br>  | **SC**<br>  |
| **PSL**<br>  | **SSL**<br>  |
| **PCCL**<br>  | **SCCL**<br>  |
| **PCSL**<br>  | **SCSL**<br>  |
| Legenda: 1 – bloco cerâmico vazado; 2 – argamassa; 3 – placa de gesso 11,5 kg/m²; 4 – placa de gesso 8,5 kg/m²; 5 – adesivo de fixação; 6 – metallic profiles type U 48/30; 7 – lã de vidro. | |

## 3. RESULTADOS

Na Figura 1 pode-se analisar comparativamente a influência do preenchimento das cavidades com lã de vidro no isolamento acústico das paredes com placas de gesso.

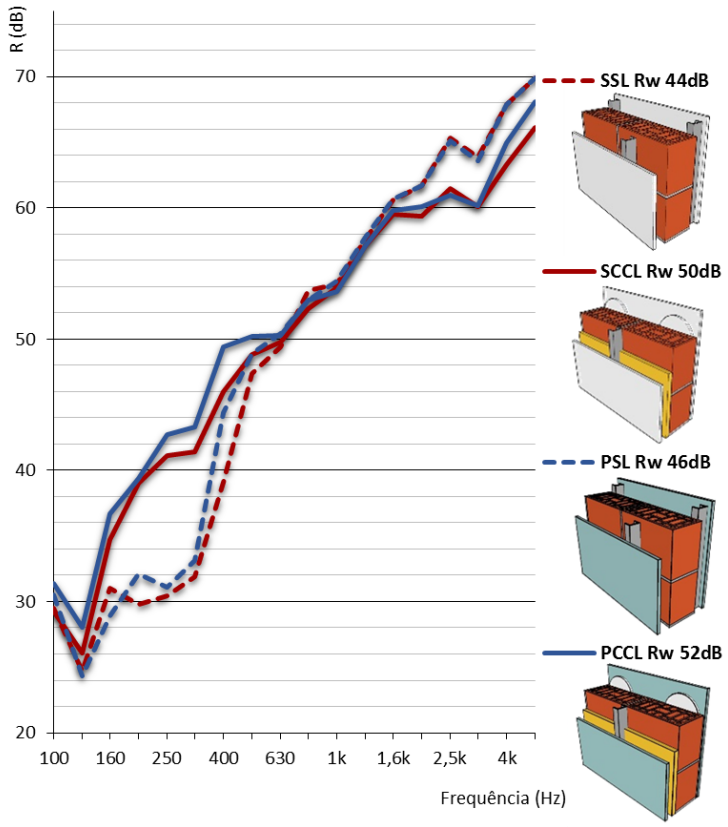



**Figura 1 – Comparação entre composições com e sem o preenchimento das cavidades.**

O desempenho acústico dos sistemas ensaiados foi determinado pela perda de transmissão sonora nas baixas frequências, que foi maior nas alvenarias com preenchimento da lã de vidro no espaço da instalação das guias metálicas. Esse comportamento também foi verificado por Sugie et all com sistemas leves de gesso acartonado [5]. Nos sistemas analisados no presente estudo, o preenchimento com lã de vidro aumentou o isolamento acústico nas bandas de frequências entre 160 Hz e 500 Hz, o que determinou um aumento de Rw em 6 dB, para os dois tipos de placas de gesso ensaiadas.

Na Figura 2 são apresentados os resultados agrupados por densidade de placa de gesso.

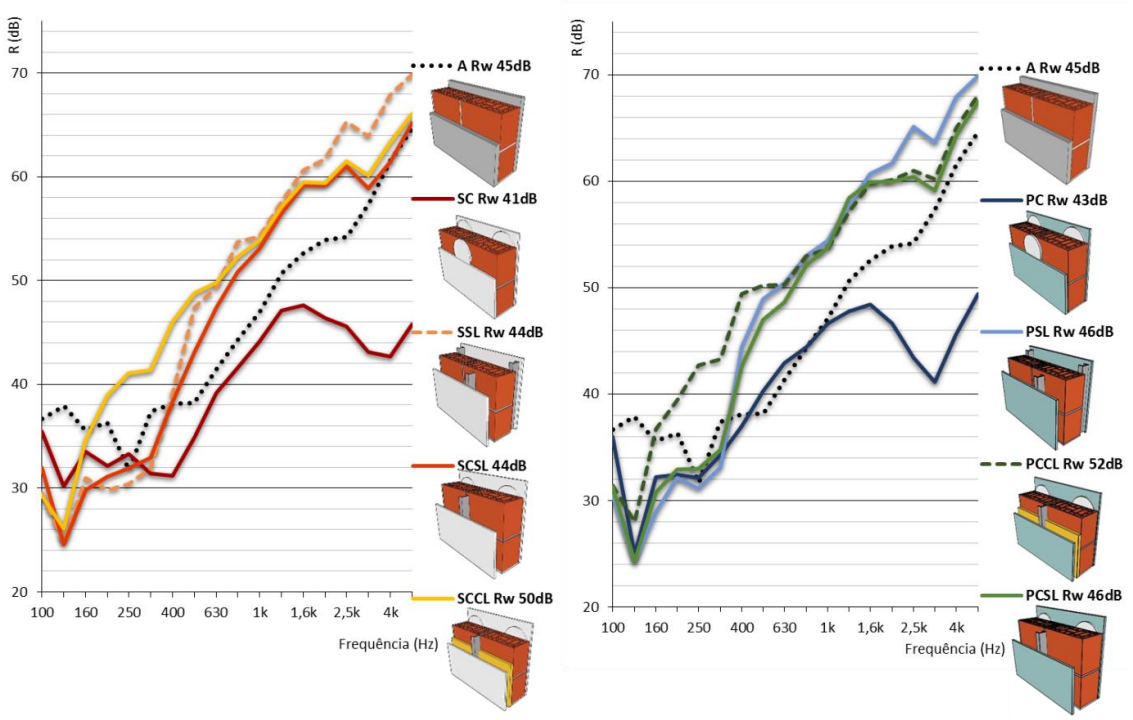



**Figura 2 – Índices de redução sonora das composições com (a) placas standard e (b) placas com maior densidade superficial.**

Na comparação entre os sistemas que utilizaram as placas de menor densidade, o sistema com as placas coladas em ambas as faces apresentou menores índices a partir da banda de frequência de 400 Hz, sendo inferior ao sistema de alvenaria com revestimento de argamassa. O sistema com placas coladas teve um decaimento significativo a partir da banda de 1600 Hz, o que determinou uma diferença de 4 dB, em relação ao sistema tradicional de alvenaria rebocada.

Essa mesma comparação pode ser feita no sistema com placas de gesso de maior densidade coladas, mas a diferença entre os resultados foi menor, de 2 dB. Nesse caso a maior rigidez da placa contribuiu para a melhoria de desempenho acústico.

Tanto nas paredes com placas standard como nas paredes com placas de maior densidade superficial, o maior isolamento acústico foi encontrado para o sistema misto, com placas coladas em uma das faces e placas fixadas em guias metálicas com preenchimento de lã de vidro na outra face.

Entre os sistemas com placas de gesso, sem preenchimento das cavidades, a instalação com guias metálicas determinou melhor desempenho acústico, comparado ao sistema com chapas coladas. Em ambos os casos, o espaçamento entre as fixações foi de 60 cm, no entanto, a fixação com cola foi realizada somente nos 4 cantos de cada placa, enquanto que, a fixação com guias metálicas ocorreu no sentido longitudinal das extremidades de cada placa, conferindo maior rigidez à superfície exposta à incidência sonora.

Na Figura 3 podem ser analisadas as diferenças decorrentes do tipo de instalação das placas nas paredes. Na Figura 3a se verifica que os sistemas com placas coladas, PC e SC, apresentaram os menores valores de $R_w$ e tiveram menores índices de redução sonora por banda de frequência a partir de 400 Hz quando comparados às paredes com placas fixadas em guias metálicas sem o preenchimento com lã de vidro. Na Figura 3b, pode-se verificar que o sistema misto com placas de maior densidade superficial coladas em uma das faces e placas standard fixadas em guias metálicas e preenchimento da lã de vidro na outra face, PS, apresentou maior índice de redução sonora de 51 dB, comparados ao de alvenaria com revestimento de argamassa e aos sistemas PC e SCCL. No gráfico da Figura 3b os índices de redução sonora por frequência da parede com revestimento de argamassa são maiores somente na frequência crítica dos demais sistemas.

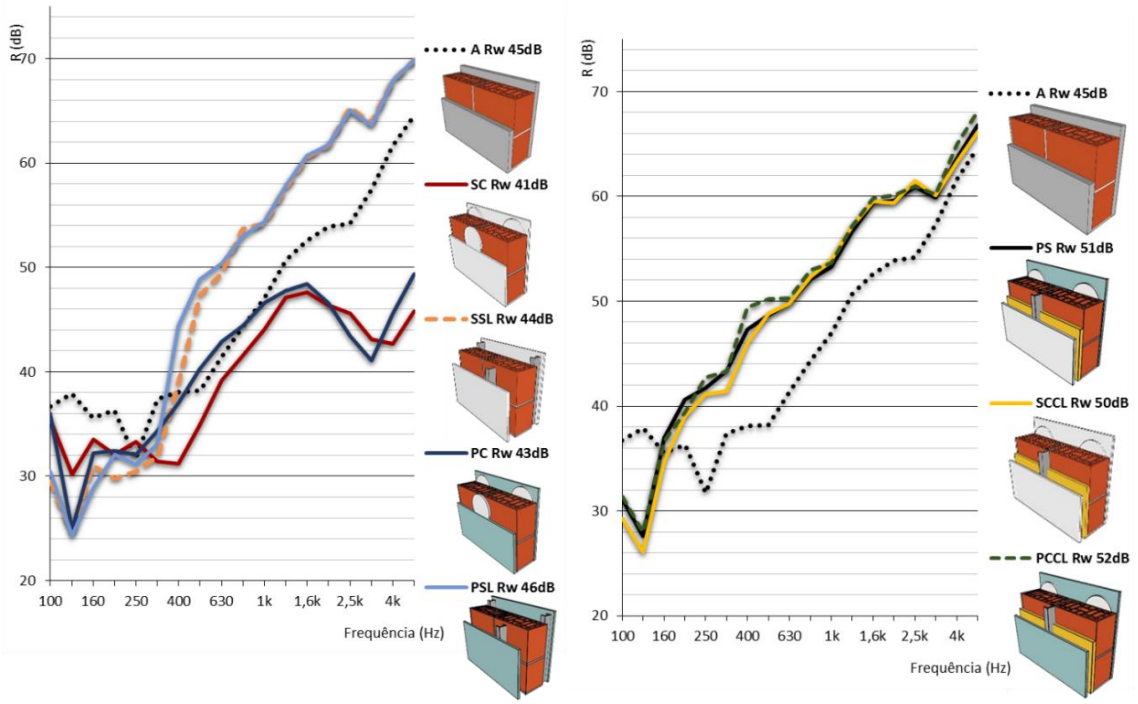



**Figura 3 – Comparação entre a parede com revestimento de argamassa e as paredes com (a) instalação colada e sem lã e (b) sistemas mistos.**

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de parede mistos compostos por alvenaria de blocos vazados e placas de gesso podem apresentar comportamento acústico diferente, decorrente do tipo de instalação e composição da parede.

Neste trabalho, o índice de redução sonora de uma parede de alvenaria de blocos vazados com revestimento de argamassa foi comparado aos índices de paredes de alvenarias com placas de gesso em diferentes composições. As paredes com placas coladas para as duas densidades superficiais de placas, apresentaram índices de redução sonora menores que os das paredes com placas fixadas em guias metálicas sem o preenchimento com lã de vidro.

Os melhores índices de redução sonora foram obtidos em paredes com sistemas mistos, nas quais ocorreram variações no tipo de instalação das placas, colada em uma das faces e com preenchimento de lã de vidro na outra face, e na densidade superficial das placas para uma mesma parede.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Cremonini, P. Fausti, E. Nannipieri, S. Secchi, and S. Smith, “Comparison between Sound Reduction Index of single and double massive walls realised in Italy and Great Britain,” in *40th Italian Annual Conference on Acoustics and the 39th German Annual Conference on Acoustics*, 2013, pp. 756–758.

[2] L. Ruiz, E. Delgado, F. J. Neila, and S. Vega, “Comparativa del comportamiento acústico entre fachadas multicapas ligeras y fachadas tradicionales,” *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 307, pp. 397–409, Feb. 2012.

[3] ISO, *ISO 10140-2: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation*. Geneva, 2010.

[4] ISO, *ISO 10140-5: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. Geneva, 2010.

[5] S. Sugie, J. Yoshimura, and T. Iwase, “Improvement of sound insulation performance at low frequencies by several fibrous absorbers in lightweight double leaf partition,” in *Inter-noise 2014*, 2014.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro:

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS; e

- Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt PERFORMANCE da UNISINOS.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE GRANDES CENTROS COMERCIAIS

PACS: 43.55.GX

António P. O. Carvalho; Cláudia F. R. T. Pereira
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
Tel.: (351) 22.508.1931
Fax: (351) 22.508.1940
carvalho@fe.up.pt; ec09018@fe.up.pt

**ABSTRACT**
This study characterizes the interior acoustics in four large shopping malls in Porto, Portugal by in situ measurements of objective acoustic parameters (reverberation time and background noise levels) comparing these with proposed ideal values and evaluating the influence that the surrounding features have on the results. Results show RT values between 1.7 and 3.2 s and $L_{Aeq}$ (with occupancy) between 67 and 70 dB.

**RESUMO**
Este projecto caracteriza a acústica interior numa amostra de quatro grandes centros comerciais da zona do Porto, Portugal (*Arrábida Shopping*, *Via Catarina*, *Norte Shopping* e *Dolce Vita Porto*) através de medições *in situ* de parâmetros acústicos objectivos (tempo de reverberação e ruído de fundo) comparando estes com valores ideais propostos e avaliando a influência que as características da envolvente têm sobre os resultados. Obtiveram-se, como exemplo, nas praças de alimentação, valores de TR entre 1,7 e 3,2 s e $L_{Aeq}$ (com ocupação) entre 67 e 70 dB.

## 1 - INTRODUÇÃO

Os centros comerciais são frequentados por inúmeras pessoas não só para a actividade comercial mas também para fins sociais e de lazer. A dimensão considerável de alguns deles, com grandes espaços de circulação, pé-direito elevado e geralmente uma ampla praça de restauração onde um elevado número de pessoas se reúnem, conduz a elevados tempos de reverberação que resultam numa fraca inteligibilidade da palavra e elevado ruído de fundo.

## 2 - CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Os centros comerciais escolhidos como casos de estudo são: *Arrábida Shopping*, *Via Catarina*, *Norte Shopping* e *Dolce Vita Porto* (Quadro 1). Por questões de confidencialidade e a pedido

de uma das entidades gestoras destes espaços, os centros comerciais citados como exemplos de casos de estudo serão designados simbolicamente, sem nenhuma ordem ou correspondência em particular, por *A*, *B*, *C* e *D* [1].

Quadro 1 – Dados principais do *Arrábida Shopping*, *Via Catarina*, *Norte Shopping* e *Dolce Vita*.

| Dados | *Arrábida Shopping* | *Via Catarina* | *Norte Shopping* | *Dolce Vita Porto* |
|---|---|---|---|---|
| **Localização (freguesia/concelho)** | Santa Marinha V. N. Gaia | Santo Ildefonso Porto | Srª da Hora Matosinhos | Campanhã Porto |
| **Inauguração** | 1996 | 1996 | 1998 | 2005 |
| **Área ($m^2$)** | 64400 | 11700 | 71740 | 38360 |
| **Lojas** | 190 | 93 | 267 | 129 |
| **Nº de pisos comerciais** | 3 | 4 | 2 | 5 |

## 3 - CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA – Medições e Resultados

### 3.1 - Valores ideais

As avaliações dos parâmetros acústicos objectivos foram realizadas em dois regimes: "sem ocupação" (após o encerramento nocturno dos centros comerciais) onde se mediu o Tempo de Reverberação (TR) e o Ruído de Fundo (RF) na praça de alimentação e no "piso de referência" (o piso inferior), e "com ocupação" (durante o seu funcionamento) apenas o RF na praça de alimentação. O objectivo deste estudo é investigar os valores destes parâmetros, a sua variabilidade e a sua adequabilidade para o conforto acústico nesta tipologia de espaços. Inicia-se o estudo com a definição dos valores ideais de forma a confrontar posteriormente com os valores medidos (Quadro 2).

Quadro 2 – Valores ideais do tempo de reverberação e ruído de fundo nos centros comerciais.

| Parâmetros acústicos | Valores ideais |
|---|---|
| Tempo de Reverberação (TR) | 1,0 a 1,2 s [500;1k;2k Hz] |
| Ruído de Fundo ($L_{Aeq}$) | ≤ 55 dB |

### 3.2 - Tempo de Reverberação (TR)

A medição do Tempo de Reverberação (TR) foi executada após o encerramento dos centros comerciais na praça de alimentação e no "piso de referência", em regime de não ocupação, de modo a não haver fontes sonoras senão as intrínsecas e permanentes ao próprio espaço. A medição foi feita com a fonte sonora (FS) num único ponto e com o sonómetro (B&K 2260) apoiado num tripé, em três posições distintas, a uma altura de cerca de 1,40 m (Fig. 1). O sonómetro fez duas leituras em cada ponto medido, obtendo-se como resultado a média aritmética das medições.

As Figuras 2 e 3 apresentam a variação dos valores do TR médio respectivamente no piso de referência e na praça de alimentação, dos quatro casos em estudo. Da Figura 2 claramente se observa que, no piso de referência, o TR médio mais curto (e mais adequado) corresponde ao centro comercial *C*. Esta situação está relacionada com a sua configuração espacial, assemelhando-se a um corredor longo e com a envolvente absorvente, logo um espaço menos reverberante. Por outro lado, o edifício mais reverberante nas frequências baixas e altas refere-se ao centro comercial *B*, enquanto em *A* o TR é mais excessivo dos 500 a 2k Hz, apresentando um pico máximo de 3,4 s aos 1k Hz. Esta situação torna-se preocupante, pois é nestas bandas de frequência que se insere o domínio preponderante da palavra, podendo assim interferir negativamente na inteligibilidade.

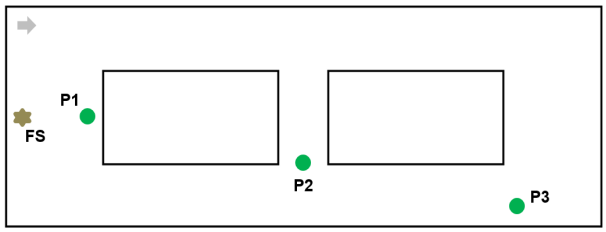



Figura 1 – Esboço genérico da configuração espacial da zona estudada, a castanho a localização da fonte sonora (FS) e materializado a verde os pontos de medição do TR (*P1*, *P2* e *P3*).

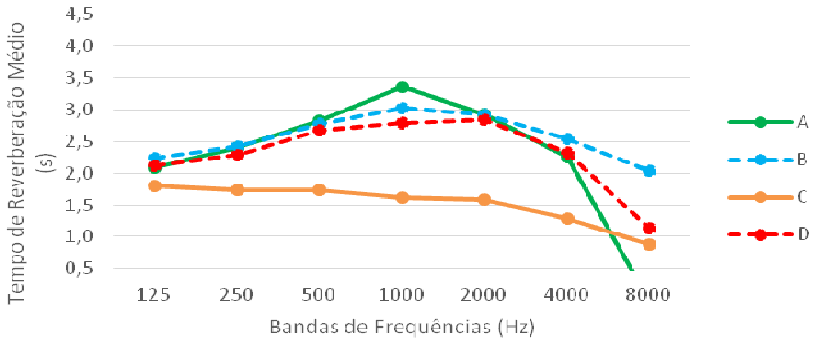



Figura 2 – Variação do TR médio no piso de referência, nos centros comerciais *A*, *B*, *C* e *D*.

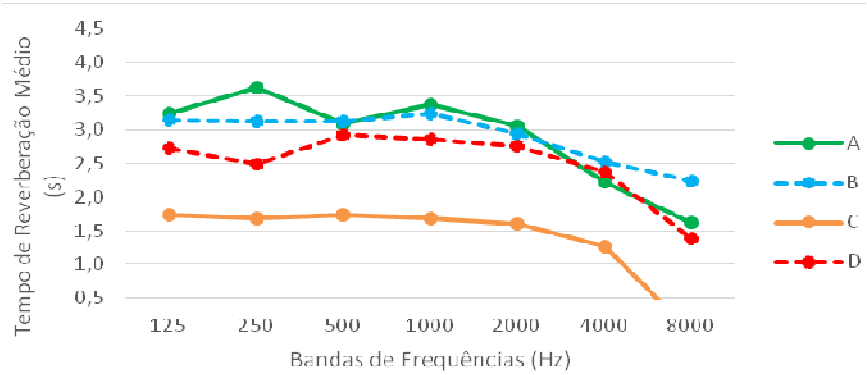



Figura 3 – Variação do TR médio na praça de alimentação nos centros comerciais *A*, *B*, *C* e *D*.

Quadro 3 – Valores dos TR médios (500, 1k e 2k Hz) no piso de referência e praça de alimentação, nos casos *A*, *B*, *C* e *D*.

| Centros Comerciais | TR (s) - Média [500;1k;2k Hz] | |
|---|---|---|
| | Piso de referência | Praça de alimentação |
| **A** | 3,0 | 3,2 |
| **B** | 2,9 | 3,1 |
| **C** | 1,7 | 1,7 |
| **D** | 2,8 | 2,8 |

Na praça de alimentação verifica-se (Fig. 3) que o TR médio mais curto (e mais adequado) corresponde novamente ao centro comercial *C*. Isto deve-se à absorção sonora pela superfície envolvente (os painéis absorventes perfurados no tecto e a presença de lonas na entrada dos restaurantes) bem como o seu pé-direito reduzido em comparação com os restantes casos, importantes para a redução das reflexões e consequentemente a reverberação do espaço. Até aos 2k Hz, o centro comercial *A* mostrou-se mais reverberante, isto porque detém um enorme pé-direito, influenciando no maior volume da zona em estudo. O caso *B* sucede ao caso

anterior a partir de cerca dos 2500 Hz, uma vez que o seu pé-direito é também considerável e sua cobertura em vidro não absorve tão eficazmente nas frequências altas.

Confrontando os TR médios de ambos os pisos entre cada centro comercial (Quadro 2) verifica-se que o TR mais longo corresponde ao centro comercial *A*, muito influenciado pelo pé-direito elevado, pelo número de andares do edifício, pela sua configuração espacial em galeria, e pelos reduzidos coeficientes de absorção sonora dos revestimentos aplicados nos dois pisos, a exemplo os cerâmicos e as superfícies em vidro que absorvem muito pouco nas frequências médias e altas. Positivamente, destaca-se o centro comercial *C* pelo seu melhor (e menor) TR, realçando que corresponde ao centro comercial com menor número de pisos, logo menor volume e consequentemente um espaço menos reverberante. A sua configuração espacial de pé-direito reduzido, conjugada com a envolvente absorvente: objectos de decoração na cobertura da praça de alimentação como candeeiros revestidos por tecidos do tipo lona, os painéis perfurados no tecto das zonas de circulação em ambos os pisos, as lonas nas entradas dos restaurantes, auxiliam na absorção sonora do espaço, reduzindo as reflexões acústicas. Acrescenta-se ainda a configuração espacial do piso de referência em forma de longo corredor, que torna o espaço menos amplo e, portanto, com valores do TR mais curtos.

Comparativamente aos valores de TR idealmente estabelecidos de 1,0 a 1,2 s, conclui-se que na presente amostra, este parâmetro encontra-se bastante acima do limite máximo do intervalo adequado em todos os centros comerciais, com menor e maior diferença nos casos *C* e *A*, respectivamente de 0,5 e 2 s.

### 3.3 - Ruído de Fundo (RF)

Para avaliar o ruído de fundo (RF) nos espaços comerciais em estudo realizaram-se medições utilizando um sonómetro (B&K 2260) apoiado num tripé. Nesta análise foram realizados dois tipos de medição: avaliação do nível sonoro de ruído de fundo sem ocupação na praça de alimentação e no piso de referência, e com ocupação na praça de alimentação. Em cada ponto, a medição do ruído de fundo durou entre 4 e 5 minutos, tendo em preocupação a estabilização do sinal rastreado. Em cada caso, recolheram-se valores para uma, duas ou três posições distintas do sonómetro (Fig. 4), consoante os acontecimentos vivenciados no espaço em questão e na altura do ensaio serem de natureza esporádica ou permanente, com os resultados fornecidos em valores médios globais (nível sonoro do ruído de fundo) e em espectro sonoro para as bandas de 1/1 oitava dos 16 aos 16k Hz.

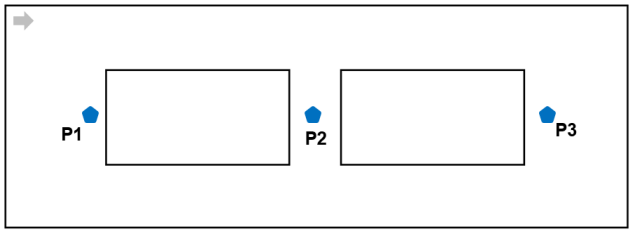



Figura 4 – Esboço genérico da configuração espacial da zona estudada nos centros comerciais, materializado a azul os pontos de medição do RF (*P1*, *P2* e *P3*), de acordo com o sentido da medição.

Note-se que, em regime de não ocupação, as medições não foram realizadas em "silêncio" total, uma vez que, na maioria dos casos, os serviços de segurança e de limpeza estavam presentes, provocando algum ruído para além do ruído particular intrínseco e permanente no espaço comercial. Realça-se também que em dois dos centros comerciais decorriam pequenas obras em lojas e átrios, e num deles a preparação de um evento na praça de alimentação.

Destacam-se, no Quadro 4, os valores médios globais do $L_{Aeq}$ do ruído de fundo para as três medições efectuadas nos pisos de referência e da praça de alimentação.

Quadro 4– Nível sonoro equivalente (média log.) do RF (sem e com ocupação) para os três pontos de medição, no piso de referência e praça de alimentação, nos casos *A*, *B*, *C* e *D*.

| $L_{Aeq}$ (dB) | Ruído de Fundo | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Sem ocupação | | Com ocupação | Variação Δ |
| | Piso de referência | Praça de alimentação | Praça de alimentação | Praça de alimentação |
| **Centros Comerciais** | **Média log.** | **Média log.** | **Média log.** | **$\Delta = [L_{c/ocup.} - L_{s/ocup.}]$** |
| **A** | 49,5 | 50,7 | 69,2 | 19 |
| **B** | 47,9 | 48,4 | 70,1 | 22 |
| **C** | 51,0 | 53,5 | 68,2 | 15 |
| **D** | 44,0 | 44,9 | 66,9 | 22 |

Para o centro comercial *A*, o piso de referência e a praça de alimentação exibiram o maior $L_{Aeq}$ de ruído de fundo nos pontos *P1*, respetivamente com 51,1 dB e 52,2 dB, o primeiro valor devido possivelmente ao ruído dos balastros presentes no local e o segundo ao ruído particular de uma máquina frigorífica numa gelataria. Realça-se a presença dos serviços de limpeza na praça de alimentação durante as medições, provocando algum ruído através dos equipamentos de limpeza e arrastamento de cadeiras e mesas, havendo porém a preocupação em medir nos períodos de maior silêncio, de modo a que o ruído captado corresponda ao intrínseco e permanente fora do horário de funcionamento do centro comercial.

Observando os resultados alusivos ao piso de referência do centro comercial *B*, o maior $L_{Aeq}$ refere-se à localização *P2* com 49,3 dB, influenciado por um sinal sonoro proveniente de um alarme. Para a praça de alimentação *B*, o maior $L_{Aeq}$ verificou-se no ponto *P2* com 50,0 dB, valor este devido ao ruído da máquina frigorífica de uma loja de gelados. Realça-se que no centro comercial não se encontravam os serviços de limpeza durante as medições, no entanto detectou-se ruído de conversação no piso inferior devido a uma reunião entre lojistas.

Na avaliação pertencente ao piso de referência do centro comercial *C*, o maior $L_{Ae}$q medido de ruído de fundo refere-se a *P3* com 51,6 dB, explicado pela maior proximidade ao local que se encontrava em obras e ao sítio onde se localizava uma máquina destinada às crianças que tocava música de tempos em tempos. Note-se que o ruído das obras não é intrínseco ao local, tratando-se de um ruído "casual". O $L_{Aeq}$ na praça de alimentação *C* foi de 53,5 dB. Neste centro comercial os serviços de limpeza encontravam-se no local durante as medições, provocando ruído. Note-se que alguns membros também se encontravam a preparar um evento para o dia seguinte, provocando igualmente ruído constante, de modo que se optou por realizar apenas uma medição distante destes acontecimentos e próxima dos restaurantes, nomeadamente de uma gelataria que continha mais ruído particular.

No piso de referência do centro comercial *D*, o $L_{Aeq}$ de ruído de fundo registado foi de 44 dB. Teve-se o cuidado de testar numa altura de menos ruído oriundo de obras que decorriam no espaço comercial, não detectando, pela audição humana, mais nenhum ruído a não ser o mencionado, justificando assim o valor determinado. Na praça de alimentação *D*, o $L_{Aeq}$ foi de 44,9 dB. Apesar da maior distância ao local das obras, distingue-se em cerca de 1 dB(A) do ruído de fundo do piso de referência, uma vez que no piso de restauração se adiciona o ruído particular das máquinas frigoríficas, mesmo que pouco relevante.

No Quadro 4 apresentam-se os valores médios (log.) globais do nível sonoro equivalente ($L_{Aeq}$) do ruído de fundo em regime de ocupação, nas praças de alimentação. Note-se, na praça de alimentação *A*, o registo elevado do $L_{Aeq}$ de ruído de ocupação. A música ambiente, a conversação entre pessoas, o arrastamento de cadeiras, o "barulho" das bandejas e respectiva louça, e o ruído particular numa área de jogos presente no local são as razões fundamentais, principalmente em dias de grande ocupação do espaço comercial, mascarando os ruídos particulares, a exemplo o ruído da ventilação do secador das mãos dos WCs.

No dia da avaliação, a praça de alimentação *B* apresentava uma densidade ocupacional elevada: pessoas a conversar, arrastamento de cadeiras, que efectivamente se sobrepôs aos ruídos particulares detectados na medição do ruído de fundo. Não se identificou música ambiente. Conjuntamente, todas as acções citadas geraram elevados níveis sonoros equivalentes do ruído de ocupação.

Para a praça de alimentação *C*, nota-se que o ruído de conversação, o arrastamento de cadeiras, "barulho" de bandejas, o rolamento dos carrinhos de recolha de bandejas e de limpeza, as máquinas e equipamentos dos restaurantes sobrepõem-se ao ruído de fundo, até porque a música ambiente mal se ouvia. Acrescentando a tudo isto ao ruído dos equipamentos da área de jogos, desencadeou-se o maior $L_{Aeq}$ do ruído de ocupação avaliado em cerca de 68,5 dB no ponto *P1*.

Na praça de alimentação *D*, o maior $L_{Aeq}$ do ruído de ocupação avalia-se em 68,2 dB em *P3*, e o menor na localização *P1* com 65,8 dB, justificados pelo aumento de densidade ocupacional verificada da localização 1 para 3.

As praças de alimentação *C* e *D* correspondem, respectivamente, ao pior e melhor caso a respeito do ruído medido sem ocupação, com o maior e menor $L_{Aeq}$, de 54 e 45 dB (variação de 9 dB). Estas situações devem-se ao ruído das obras, da máquina frigorífica da gelataria, dos serviços de limpeza, cumulativamente à preparação de um evento, a afectar negativamente o ruído de fundo detectado pelo sonómetro em *C.* Já em *D*, apesar das obras, as medições foram razoavelmente distantes deste distúrbio sonoro, acrescendo ao facto de não se notar nenhum ruído particular significativamente intenso, quando comparado com os outros casos.

Quanto ao ruído de ocupação, a praça de alimentação *B* apresenta-se como o caso mais problemático, em contrapartida a *D*, respectivamente através dos $L_{Aeq}$ de 70 e 67 dB contabilizados. A variação do $L_{Aeq}$ apresenta um intervalo mais restrito, de 3 dB, uma vez que, em todos os centros comerciais, no dia das medições neste regime, a densidade ocupacional era elevada, experienciando alguns ruídos em comum, como conversação, arrastamento de cadeiras. Relembre-se que em *B*, talvez por se tratar da praça de alimentação de menor área, nas posições medidas estava-se próximo dos acessos às escadas rolantes e zonas de ligação, locais onde se concentram mais pessoas, tudo fica mais concentrado, a combinar com a enorme densidade de ocupação que se fazia sentir. Mesmo tendo sido a medição mais próxima da hora do almoço, logo mais pessoas, à partida mais ruído, o centro comercial *D* foi o melhor caso, uma vez que é um espaço bastante amplo, onde as pessoas não tendem a concentrar-se tanto e o teto absorvente auxilia na diminuição do ruído ambiente (contrariamente ao caso *B* uma vez que não apresenta esta característica de material). Repare-se que a presença de música ambiente e do som da fonte de água ajudam a mascarar o ruído mais intenso da ocupação, pois tratam-se de fontes sonoras agradáveis e relaxantes, auxiliando a que os usuários façam o esforço de as ouvir em vez de produzir ruído.
Pelo Quadro 4, todos os casos estudados em regime de ocupação, ultrapassaram o valor ideal estimado de 55 dB(A) em cerca de 12 a 15 dB(A). Note-se ainda o intervalo respeitante à diferença entre o ruído de ocupação relativamente ao ruído sem ocupação, de 15 a 22 dB(A).

Finalizando, o $L_{Aeq}$ do ruído sem ocupação em alguns casos foi fortemente influenciado por ruídos não correntes nem intrínsecos ao próprio espaço, como a exemplo, as pequenas obras e a preparação de um evento. Neste sentido, retirando estes ruídos "casuais", é possível proceder a uma estimação próxima da variação dos $L_{Aeq}$ do ruído com ocupação relativamente aos do ruído sem ocupação, tomando como modelo o $L_{Aeq}$ médio global avaliado para o centro comercial *D* (melhor caso de estudo para o ruído medido sem ocupação). Considerando como referência os 45 dB como valor global do $L_{Aeq}$ (sem ocupação) para todas as praças de alimentação estudadas, a variação entre o ruído detectado nos dois regimes aumentou (Quadro 5), uma vez que estando o espaço isento dos ruídos não correntes, o ruído de fundo reduz-se, contabilizando o sonómetro apenas os sinais sonoros inerentes e permanentes do

local. Assim, conclui-se que os centros comerciais em funcionamento fazem aumentar o ruído de fundo entre +22 a +25 dB(A) sobre o ruído sem ocupação.

Quadro 5 – Comparação dos valores médios globais dos $L_{Aeq}$, para as praças de alimentação *A*, *B*, *C* e *D*, do ruído de ocupação em relação ao menor ruído sem ocupação medido na amostra em estudo (* menor valor obtido nos 4 centros comerciais = valor de referência).

| Praças de alimentação | $L_{Aeq}$ (dB) - Valores médios | | |
|---|---|---|---|
| | Com ocupação | Sem ocupação | $\Delta = [L_{c/ocup.} - L_{s/ocup.}]$ |
| **A** | 69 | 45 * | 24 |
| **B** | 70 | | 25 |
| **C** | 68 | | 23 |
| **D** | 67 | | 22 |
| **$\Delta$ = [máx. - mín.]** | 3 | - | 3 |

## 4 - CONCLUSÕES

Dos parâmetros acústicos mensurados resumem-se quantitativamente e qualitativamente no Quadro 6, os valores globais e a corresponde avaliação nas praças de alimentação estudadas.

Quadro 6 – Avaliação qualitativa e quantitativa dos valores globais do TR (s), $L_{Aeq}$ (dB) e $\Delta L_{Aeq}$ (dB) (diferença relativamente aos 45 dB(A) de referência do menor ruído de fundo medido sem ocupação), com respectiva variação e valores ideais, nas praças de alimentação (*A*, *B*, *C* e *D*).

| Centros Comerciais (Praças de alimentação) | TR [500; 1k; 2k Hz] (s) | | Ruído de Ocupação (dB) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $L_{Aeq}$ | | $\Delta L_{Aeq} = [L_{c/ ocup.} - L_{s/ ocup.ref.}]$ |
| **A** | 3,2 | *PIOR* | 69 | - | 24 |
| **B** | 3,1 | - | 70 | *PIOR* | 25 |
| **C** | 1,7 | *MELHOR* | 68 | - | 23 |
| **D** | 2,8 | - | 67 | *MELHOR* | 22 |
| **$\Delta$ = [máx. - mín.]** | 1,5 | - | 3 | - | 3 |
| **Valores ideais** | 1,0 – 1,2 | - | ≤ 55 | - | - |

Os valores de TR permitem concluir que a praça de alimentação do centro comercial *A* exibiu o mais longo TR (3,2 s), correspondendo ao pior caso estudado na amostra (o piso de referência também ostentou o mais longo TR, de 3,1 s). A reverberação mais excessiva mediu-se nas bandas dos 500 a 2k Hz, frequências relacionadas com o domínio da palavra, o que pode desencadear dificuldades na inteligibilidade da mesma. Em contrapartida, a praça de alimentação *C* destacou-se por ser a melhor da amostra, uma vez que patenteou o menor valor do TR (1,7 s, também medido no piso de referência). A variação dos valores globais de TR nas áreas de restauração foi bastante significativa, uma vez que o pior caso diferiu do melhor em cerca de 1,5 s. Em relação aos valores do TR idealmente estabelecidos de 1,0 a 1,2 s, conclui-se que este parâmetro encontra-se, em todos os casos, muito acima do limite máximo, com menor e maior diferença nos casos *C* e *A*, respectivamente de 0,5 e 2,0 s, revelando-se assim uma grande tendência de sobreposição dos sons reflectidos aos sons directos.

Sobre o ruído de fundo, a praça de alimentação do centro comercial *B*, de $L_{Aeq}$ de 70 dB com ocupação, apresentou-se como o pior caso estudado. Por outro lado, *D*, com o $L_{Aeq}$ de 67 dB, foi o melhor caso. A variação do $L_{Aeq}$ apresentou um intervalo restrito de 3 dB em regime de ocupação, explicado por no dia das medições, a densidade ocupacional ser elevada em todos os centros comerciais, experienciando alguns ruídos em comum. Todos os casos em regime de ocupação, ultrapassaram o valor máximo ideal de 55 dB(A), em cerca de 12 a 15 dB(A), por um lado expectável pela densidade ocupacional verificada, mas por outro alarmante. Atente-se que o nível do ruído de ocupação ostenta um valor bastante excessivo para o conforto acústico e

bem-estar de quem experiencia a atmosfera sonora nos centros comerciais, pelo que este parâmetro requer ponderação e controlo.

Não só pela sensação de desconforto e interacção na saúde humana, como também pela "incompatibilidade" relativamente à inteligibilidade da palavra, o ruído quando elevado torna o espaço acusticamente desfavorável, principalmente se se intensificar nas frequências de maior sensibilidade auditiva, entre cerca de 1k a 4k Hz.

A envolvente confinada a cada espaço tem um papel determinante na definição e finalidade acústica do mesmo. Nota-se, por este estudo, que as características da envolvente, desde a sua dimensão aos materiais de revestimento, em conjunto com os objectos locais intrínsecos, explicaram praticamente todas as conclusões retiradas. De todas as características, resumem-se as negativas: número de pisos, pé-direito e volume de dimensão considerável; configuração em galeria interligando os diferentes espaços do centro comercial, auxiliando na propagação do ruído; espaços de restauração de área reduzida, concentrando as pessoas e centralizando as actividades e acessos; revestimentos com materiais reflectores ou pouco absorventes (como cerâmicos, mármore ou azulejos) e superfícies em vidro; reduzida ou nula aplicação de materiais ou sistemas absorventes; máquinas e equipamentos ruidosos acusticamente pouco ou nada tratados; carrinhos com rolamentos não silenciosos e cadeiras e mesas com borrachas gastas ou sem elas, produzindo ruído quando arrastadas. Em contrapartida, as características positivas verificadas em alguns dos casos estudados, que também podem ser tomadas como sugestões de melhoria para futuros projectos e execução de centros comerciais, consistem: número de pisos, pé-direito e volume reduzidos; configuração espacial do tipo longos corredores, com pouca interacção entre os espaços; praças de alimentação amplas de forma a não aglomerar as pessoas, consequentemente o ruído. Outras particularidades favoráveis detectadas que, na ausência, podem igualmente tomar-se como propostas de intervenção, abarcam: tratamento acústico do ruído particular das máquinas e equipamentos através de sistemas de refrigeração/ventilação/outros mais silenciosos; presença de borrachas nas pernas das mesas e cadeiras; rolamentos silenciosos nos carrinhos; e, principalmente, inexistência ou menor aplicação de materiais reflectores em detrimento dos absorventes, a exemplo, painéis perfurados e/ou *baffles* (sistemas absorsores suspensos) no tecto, materiais porosos e fibrosos nos objectos de decoração (tecidos, almofadados) e nas paredes (aglomerados de fibras de madeira, etc.), bem como mais recantos com sofás e alcatifas. Note-se que estes e tantos outros exemplos podem ser considerados para as devidas correcções acústicas.

Por conseguinte, objectiva-se sucintamente: diminuir a reverberação do espaço, concretamente as reflexões acústicas, realçando o som directo, através do tipo e forma das superfícies e volume dos centros comerciais; aumentar a absorção sonora e minorar os efeitos das fontes ruidosas, de modo reduzir o ruído ambiente. Realça-se que a absorção sonora da envolvente está na base dos melhores resultados da caracterização acústica dos centros comerciais deste estudo. Todos estes factores equilibrados caminham para uma melhor inteligibilidade da palavra, uma melhor qualidade e conforto do espaço, consentindo a que os usuários passem mais tempos nos centros comerciais.

De todas as exigências construtivas que um determinado local acarreta, talvez a mais ignorada é a própria acústica, pois por incoerência a estética tende quase sempre a sobrepor-se. Contudo, são estas atitudes que não podem acontecer. Um espaço acusticamente mau tem menos clientes do que outro melhor idealizado e concretizado.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Cláudia F. R. T. Pereira, *Caracterização acústica de grandes centros comerciais - Centros comerciais do Grande Porto*. Dissertação de Mestrado MIEC, FEUP, 2015.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# SOLUÇÃO COMBINADA DE SUBCAMADAS DE AGLOMERADOS DE CORTIÇA PARA SISTEMAS DUPLOS DE LAJE E PAVIMENTO FLUTUANTES

PACS: 43.40.Kd

António P. O. Carvalho[1]; Carolina R. G. Mateus[1]; Marina I. N.Rodrigues[2]
[1] Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
Rua Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
Tel.: (351) 22.508.1931
Fax: (351) 22.508.1940
[2] *Amorim Cork Composites*, 4535-186 Mozelos, Portugal
carvalho@fe.up.pt; carolina_rui@hotmail.com; mrodrigues.ACC@amorim.com

**ABSTRACT**
Floating floor, floating slab and double-floating systems, with different floorings, were tested using sublayers (and underlayers) of cork and rubber composites, combined or not, to develop a solution with optimized efficacy in reducing impact transmission noise. It was found that, regardless of the final covering, for floating floor and flooring slab, there is a specifically better sublayer, and that the most effective for sublayer floating slab is also the one that incorporates the most effective double-floating system. In addition, the double-floating system was revealed to be more effective than floating floor, but this was not always the case when compared to floating concrete floors.

**RESUMO**
Com o objectivo de desenvolver uma solução de desempenho optimizado a ruídos de percussão para diversos revestimentos finais, ensaiaram-se pavimentos, lajes flutuantes e sistemas duplo-flutuantes utilizando subcamadas de aglomerados compostos de cortiça e borracha reciclada, combinados ou não. Revelou-se que para qualquer revestimento final há, tanto para pavimento como laje flutuante, uma subcamada com destacada eficácia e aquela com maior eficácia em laje flutuante é igualmente a mais eficaz em sistema duplo-flutuante. Além disso, o sistema duplo-flutuante revelou ser mais eficaz que o pavimento flutuante, mas nem sempre isso acontece relativamente ao sistema de laje flutuante.

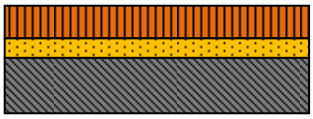
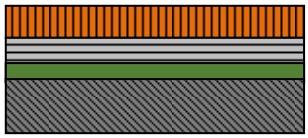
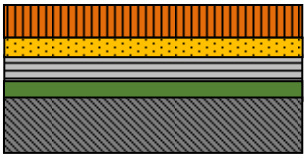
## 1. Introdução

Sendo o ruído de percussão um dos maiores factores de incomodidade em edifícios, uma vez que tem a capacidade de se propagar por todo o edifício utilizando os elementos de construção como transmissores da energia sonora, uma das mais eficazes soluções para diminuir este ruído é desacoplando os elementos constituintes do pavimento através da incorporação de subcamadas resilientes. Dependendo da posição da subcamada, essa irá aqui denominar-se como *underlay* (se sob o revestimento final em "pavimento flutuante", P) ou *underscreed* (se sob a lajeta ou betonilha em "laje flutuante", L) (quadro 1). Além destes sistemas flutuantes, é ainda aplicado num outro incorporando ambas as subcamadas (*underlay* e *underscreed*) no

mesmo pavimento (sistema duplo-flutuante, D) e acredita-se que o seu desempenho é melhor do que o obtido quando aplicada somente uma das subcamadas no pavimento, ou seja, que tem maior eficácia do que o sistema de pavimento ou laje, flutuantes isolados [1].

De forma a dar resposta a questões, tais como: O sistema duplo-flutuante é mais eficaz que os restantes?, Quanto mais eficaz?, Quais as subcamadas que maximizam a eficácia desse sistema?, desenvolveu-se este estudo.

Quadro 1 – Quadro resumo dos tipos de sistemas flutuante e sua constituição.

| **Denominação** | **Esquema representativo do tipo de pavimento** | **Material resiliente (subcamada)** | **Legenda** |
|---|---|---|---|
| Pavimento Flutuante (P) |  | *Underlay* | Revestimento final de piso<br>  <br>*Underlay*<br>  <br>*Underscreed*<br>  <br>Betonilha<br>  <br>Laje estrutural<br>  |
| Laje Flutuante (L) |  | *Underscreed* | |
| Sistema Duplo Flutuante (D) |  | *Underlay* e *Underscreed* | |

## 2. Amostras

Os revestimentos finais de piso usados neste estudo foram: Madeira de Encaixe (ME); Madeira (M), Cerâmico (C) e Vinil (V); e as subcamadas resilientes foram: aglomerado composto de cortiça ($U_{32}$), aglomerado composto de cortiça combinada com poliuretano ($U_{85}$), aglomerado composto de cortiça combinada com borracha reciclada ($U_{66}$) e aglomerado composto de borracha reciclada ($U_{22}$) (fig. 1). Todas as subcamadas usadas no estudo, à excepção do aglomerado composto de cortiça combinada com borracha reciclada ($U_{66}$), são comercializadas (pela *ACC*) e aplicadas tanto como *underlay* como *underscreed*, isto é, como subcamada em sistema de pavimento (P) ou laje flutuante (L) (quadro 2).

Quadro 2 – Nomenclatura adoptada dos materiais envolvidos neste estudo (produzidos pela *ACC – Amorim Cork Composites*).

| **Aglomerado composto** | *Underlay* ($U_L$) | *Underscreed* ($U_S$) |
|---|---|---|
| de cortiça | $U_L$61 | $U_S$61 |
| de cortiça combinado com poliuretano (PU) | $U_L$85 | $U_S$85 |
| de cortiça combinado com borracha reciclada | $U_L$66 | - |
| de borracha reciclada | $U_L$22 | $U_S$22 |

Além da variabilidade das subcamadas já apresentadas, a *ACC*, possui ainda, dependendo do material, da função (*underlay* ou *underscreed*) e do revestimento final, diferentes espessuras disponíveis para cada subcamada. Com tanta variabilidade de subcamadas (*underlay* e *underscreed*) o número e a variabilidade de combinações de sistemas duplo-flutuantes é forçosamente grande.

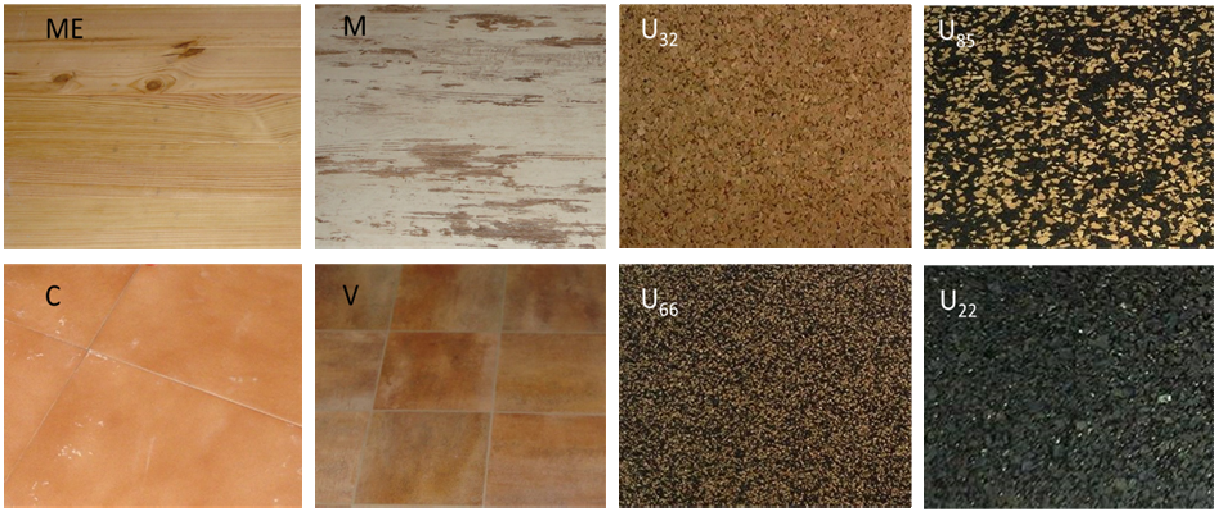



Fig. 1 – Revestimentos finais: Madeira de Encaixe (ME); Madeira (M; Cerâmico (C; Vinil (V) e subcamadas de aglomerado composto: de cortiça ($U_{32}$); de cortiça combinada com poliuretano ($U_{85}$); de cortiça combinada com borracha reciclada ($U_{66}$); de borracha reciclada ($U_{22}$) utilizados.

Quadro 3 – Soluções de sistema duplo flutuantes (D) avaliadas, em que: * valores de catálogo; *1 Subcamada resiliente com 3 mm de espessura e perfurada (neste caso, com aberturas rectangulares, de forma padronizada, ao longo de toda a subcamada);*2 Subcamada resiliente perfilada com espessura x/y com ondulações em que a maior espessura é x e a menor y mm (fig. 2); P – pavimento flutuante; L – laje flutuante; D – Sistema duplo flutuante.

| Revestimento | $U_L$ | Espessura (mm) | $\Delta L_w,P^*$ (dB) | $U_s$ | Espessura (mm) *2 | $\Delta L_w,L^*$ (dB) | Obs. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Madeira de encaixe (ME) | $U_L61$ | 2 | 20 | $U_s61$ | 6/3 | 20 | # |
| | $U_L61$ | 2 | 20 | $U_s61$ | 10/5 | 22 | # |
| | $U_L85$ | 2 | 19 | $U_s85$ | 6/3 | 22 | □ |
| | $U_L66$ | 2 | 17 | $U_s22$ | 8/4 | 23 | o |
| | $U_L85$ | 2 | 19 | $U_s22$ | 6/3 | 23 | ⌂ |
| | $U_L61$ | 2 | 20 | $U_s22$ | 4/2 | 22 | ⌂ |
| Madeira (M) | $U_L61$ | 3 | 26 | $U_s61$ | 8/4 | 21 | # |
| | $U_L61$ | 3perf *1 | 18 | $U_s61$ | 10/5 | 22 | # |
| | $U_L22$ | 3 | 20 | $U_s22$ | 6/3 | 23 | Δ |
| | $U_L66$ | 2 | 18 | $U_s22$ | 6/3 | 23 | o |
| | $U_L61$ | 3 | 26 | $U_s85$ | 6/3 | 22 | ⌂ |
| | $U_L22$ | 3 | 20 | $U_s85$ | 6/3 | 22 | ⌂ |
| | $U_L61$ | 3perf *1 | 18 | $U_s85$ | 6/3 | 22 | ⌂ |
| | $U_L61$ | 3perf *1 | 18 | $U_s22$ | 6/3 | 23 | ⌂ |
| Cerâmico (C) | $U_L61$ | 5 | 16 | $U_s61$ | 6/3 | 20 | # |
| | $U_L61$ | 5 | 16 | $U_s61$ | 10/5 | 22 | # |
| | $U_L66$ | 2 | 18 | $U_s85$ | 6/3 | 22 | ⌂ |
| | $U_L66$ | 2 | 18 | $U_s22$ | 6/3 | 23 | o |
| Vinil (V) | $U_L66$ | 2 | 19 | $U_s22$ | 4/2 | 22 | o |
| | $U_L85$ | 1,6 | 17 | $U_s85$ | 4/2 | 20 | □ |
| | $U_L85$ | 1,6 | 17 | $U_s22$ | 4/2 | 22 | ⌂ |

*Underlay* e *underscreed* constituídos por: Δ – Borracha reciclada; o - Cortiça e borracha reciclada; □ - Cortiça e poliuretano; # - Cortiça; ⌂ - Materiais distintos

As combinações ensaiadas neste estudo são apresentadas no quadro 3 (21 sistemas duplo-flutuantes (D)). Para além destes 21 sistemas foram também testados os pavimentos e lajes flutuantes correspondentes isoladamente, o que perfaz um total de 47 ensaios.

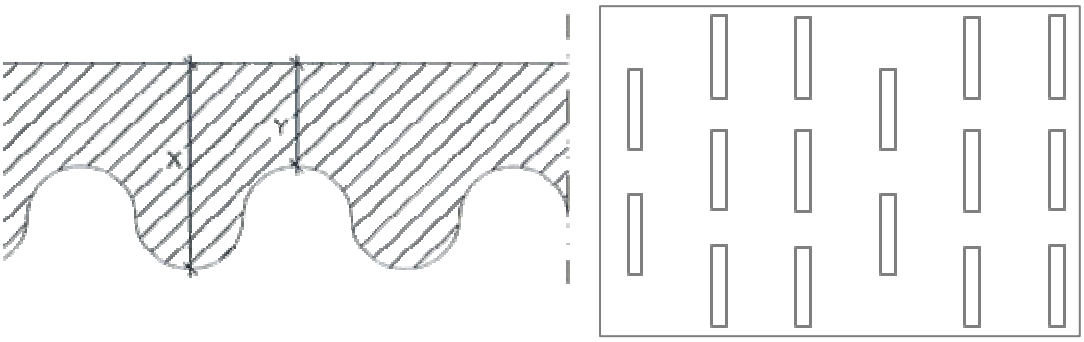



Fig. 2 – Esquemas do corte de uma subcamada resiliente perfilada (*dimpler*), em que: a maior espessura é de x e a menor de y mm (a relação entre elas é de 2) (esquerda) e de uma subcamada resiliente com 3 mm de espessura e perfurada (neste caso, com aberturas rectangulares de forma padronizada, ao longo de toda a subcamada (direita).

## 3. Metodologia de Ensaio

Sendo o principal objectivo deste estudo encontrar a solução optimizada de um sistema duplo-flutuante (D) de forma a diminuir o ruído de percussão, tal é conseguido, principalmente, através da análise de dois parâmetros: o índice de isolamento sonoro normalizado de cada solução ensaiada (Lw) e a respectiva *Eficácia* (ΔLw). O cálculo desses parâmetros foi feito segundo as normas NP EN ISO 140-8 e 717-2 [2, 3] sendo analisadas 16 bandas de frequência (100 a 3150 Hz).

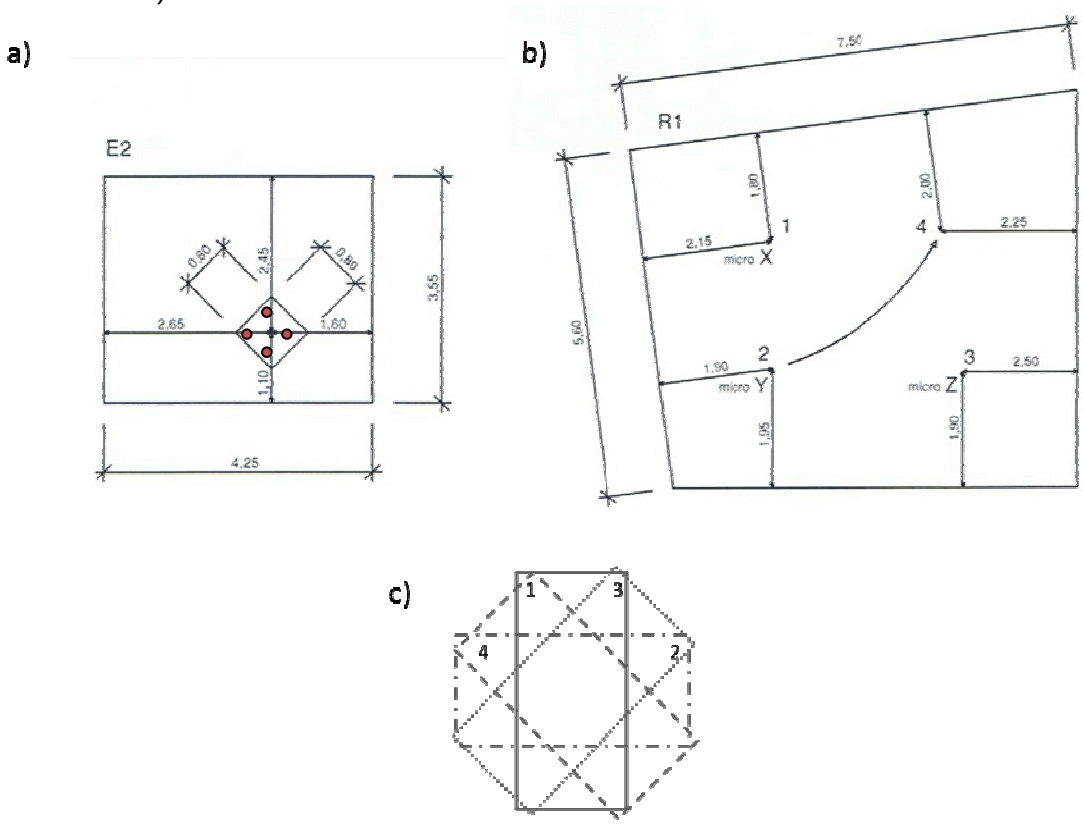



Fig. 3 – Esquemas da posição, na câmara emissora de ensaio, de todas as amostras (a)), da posição dos microfones, na câmara receptora nas medições do ruído de percussão provocado na câmara emissora (b)) e das posições da máquina de impactos normalizada adoptadas em casa ensaio (c)).

Os ensaios foram realizados nas câmaras reverberantes do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e conforme as supracitadas normas com as seguintes directrizes:

- colocação de 4 blocos de betão (7,5 kg cada) sobre a amostra a ensaiar (pontos encarnados na fig. 3a)): procura simular o mobiliário normal existente numa situação real;
- quatro posições da máquina de impactos normalizada (fig. 3c));
- por cada posição da máquina de impactos: quatro medições (fig. 3b).

De forma a não haver variabilidade de ensaio para ensaio, procedeu-se à marcação com fita adesiva, tanto no pavimento da câmara emissora o local onde as amostras deveriam ser ensaiadas (figura 3a)), como na câmara receptora as posições dos microfones.

Quadro 4 – Valores normativos e não-normativos (NN) da *Eficácia* a ruídos de percussão para cada sistema flutuante ensaiado (pavimento - $\Delta L_{w,}P$ e $\Delta L_{w,}P_{NN}$; laje - $\Delta L_{w,}L$ e $\Delta L_{w,}L_{NN}$; duplo - $L_{w,}D$ e $\Delta L_{w,}D_{NN}$) e a diferença de *Eficácias* não-normativas entre o sistema duplo flutuante e a melhor solução individualizada correspondente ($\Delta\Delta L_w NN = \Delta L_{w,}D_{NN}$ – max. $\{\Delta L_{w,}L_{NN}; \Delta L_{w,}L_{NN}\}$, em que:* - Subcamada resiliente perfilada com espessura x/y – subcamada resiliente com ondulações em que a maior espessura é x e a menor y mm (fig. 2 esq.); *1 Subcamada resiliente com 3 mm de espessura e perfurada (com aberturas rectangulares) (fig. 2 dir.).

| Rev. final | $U_L$ | Esp. (mm) | $\Delta L_{w,}P$ NN (dB) | $\Delta L_{w,}P$ (dB) | $U_s$ | Esp. (mm) | $\Delta L_{w,}L$ NN (dB) | $\Delta L_{w,}L$ (dB) | $\Delta L_{w,}D_{NN}$ (dB) | $\Delta L_{w,}D$ (dB) | $\Delta\Delta L_w$ NN (dB) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $ME_1$ | $U_L61$ | 2 | 15,3 | 15 | $U_s61$ | 6/3* | 17,1 | 17 | 17,5 | 17 | 0,4 |
| $ME_2$ | $U_L61$ | 2 | 15,3 | 15 | $U_s61$ | 10/5* | 17,1 | 17 | 19,1 | 19 | 2,0 |
| $ME_3$ | $U_L85$ | 2 | 15,8 | 15 | $U_s85$ | 6/3* | 18,2 | 18 | 19,3 | 19 | 1,1 |
| $ME_4$ | $U_L66$ | 2 | 16,3 | 16 | $U_s22$ | 8/4* | 18,4 | 18 | 21,6 | 21 | 3,2 |
| $ME_5$ | $U_L85$ | 2 | 15,8 | 15 | $U_s22$ | 6/3* | 19,1 | 19 | 20,7 | 20 | 1,6 |
| $ME_6$ | $U_L61$ | 2 | 15,3 | 15 | $U_s22$ | 4/2* | 17,7 | 17 | 20,8 | 20 | 3,1 |
| $M_1$ | $U_L61$ | 3 | 15,3 | 15 | $U_s61$ | 8/4* | 22,0 | 21 | 21,4 | 21 | -0,6 |
| $M_2$ | $U_L61$ | 3 perf*1 | 15,2 | 15 | $U_s61$ | 10/5* | 21,7 | 21 | 21,6 | 21 | -0,1 |
| $M_3$ | $U_L22$ | 3 | 15,7 | 15 | $U_s22$ | 6/3* | 22,1 | 22 | 23,8 | 23 | 1,7 |
| $M_4$ | $U_L66$ | 2 | 15,8 | 15 | $U_s22$ | 6/3* | 22,1 | 22 | 23,6 | 23 | 1,5 |
| $M_5$ | $U_L61$ | 3 | 15,3 | 15 | $U_s85$ | 6/3* | 23,1 | 23 | 21,2 | 21 | -1,9 |
| $M_6$ | $U_L22$ | 3 | 15,7 | 15 | $U_s85$ | 6/3* | 23,1 | 23 | 21,4 | 21 | -1,7 |
| $M_7$ | $U_L61$ | 3 perf*1 | 15,2 | 15 | $U_s85$ | 6/3* | 23,1 | 23 | 22,2 | 22 | -0,9 |
| $M_8$ | $U_L61$ | 3 perf*1 | 15,2 | 15 | $U_s22$ | 6/3* | 22,1 | 22 | 23,1 | 23 | 1,0 |
| $C_1$ | $U_L61$ | 5 | 14,3 | 14 | $U_s61$ | 6/3 | 18,4 | 18 | 18,7 | 18 | 0,3 |
| $C_2$ | $U_L61$ | 5 | 14,3 | 14 | $U_s61$ | 10/5 | 18,9 | 18 | 19,3 | 19 | 0,4 |
| $C_3$ | $U_L66$ | 2 | 14,6 | 14 | $U_s85$ | 6/3 | 19,8 | 19 | 20,8 | 20 | 1,0 |
| $C_4$ | $U_L66$ | 2 | 14,6 | 14 | $U_s22$ | 6/3 | 20,4 | 20 | 22,4 | 22 | 2,0 |
| $V_1$ | $U_L66$ | 2,0 | 18,8 | 18 | $U_s22$ | 4/2 | 32,0 | 32 | 31,7 | 31 | -0,3 |
| $V_2$ | $U_L85$ | 1,6 | 19,5 | 19 | $U_s85$ | 4/2 | 29,1 | 29 | 28,3 | 28 | -0,8 |
| $V_3$ | $U_L85$ | 1,6 | 19,5 | 19 | $U_s22$ | 4/2 | 32,0 | 32 | 31,8 | 31 | -0,2 |

## 4. Análise dos resultados

Além da *Eficácia* ($\Delta L_w$), consideraram-se ainda os seguintes parâmetros:

- $\Delta L_w NN$ – *Eficácia* Não-Normativa, em que o ajuste da NP EN ISO 717-2 [3] é feito com uma casa decimal em vez de zero, permitindo uma diferenciação entre *Eficácias*;
- $\Delta\Delta L_w = \Delta L_{w,}D$ – máx.$\{\Delta L_{w,}P,; \Delta L_{w,}L\}$ – *Diferença de Eficácias*, que representa a diferença entre *Eficácias* de um sistema duplo flutuante (D) e a solução respectiva mais eficaz individualmente (pavimento P ou laje flutuante L)

* Este parâmetro também foi analisado de forma não-normativa (NN);

- $m\Delta\Delta L_w$ NN = $\Delta mL_{w,}D_{NN}$ - $\Delta mL_{w,}L_{NN}$, a diferença entre a *Eficácia* dos sistemas duplo flutuante (D) e de laje flutuante (L) com melhor desempenho (m), para cada revestimento final. Não se considerou o pavimento flutuante (P), porque para todos os revestimentos finais ensaiados, como se verá adiante, este é sempre menos eficaz que o de laje flutuante (L).

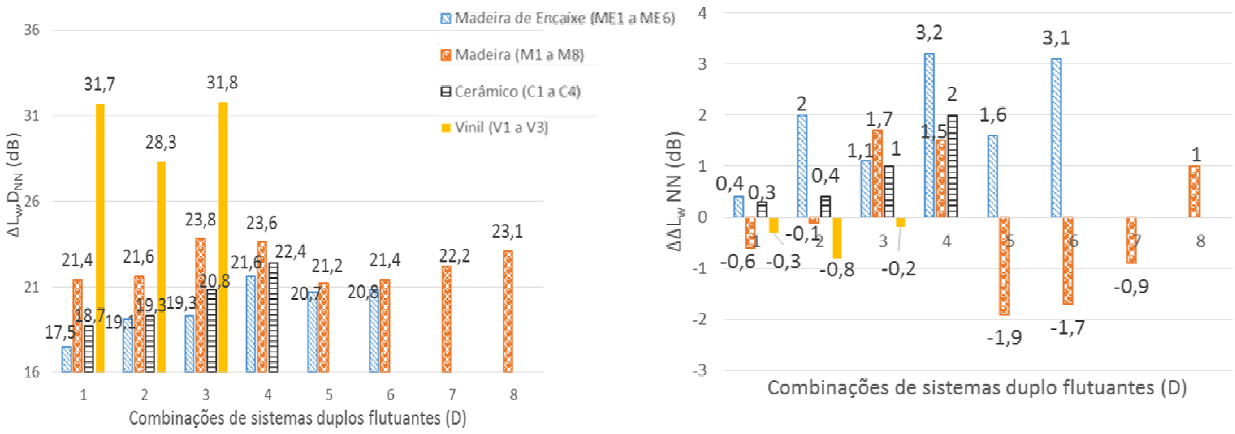



Fig. 4 – Valores não-normativos (NN) da *Eficácia* dos sistemas duplo flutuantes (D) ensaiados (esquerda) da diferença de *Eficácias* entre os sistemas duplo flutuantes D e a melhor solução individualizada correspondente, para os diferentes revestimentos finais (madeira de encaixe ($ME_1$ a $ME_6$), madeira ($M_1$ a $M_8$), cerâmico ($C_1$ a $C_4$) e vinil ($V_1$ a $V_3$), em que: $\Delta\Delta L_w$ NN = $\Delta L_{w,}D_{NN}$ – máx. {$\Delta L_{w,}P_{NN}$; $\Delta L_{w,}L_{NN}$}.

Através da análise não normativa (NN) foi possível concluir que no conjunto das amostras ensaiadas:

- Quando o revestimento final é a madeira de encaixe (ME) e se o sistema flutuante pretendido for o pavimento flutuante (P), isto é, só com *underlay*, a subcamada mais eficiente, é a $U_L66$ com espessura de 2 mm (com $\Delta L_{w,}P_{NN}$ =16,3 dB). No caso do sistema a aplicar ser o de laje flutuante (L), a escolha com maior eficiência ($\Delta L_{w,}L_{NN}$=19,1 dB) é a subcamada $U_s22$ de 6/3 mm. No caso dum sistema duplo flutuante (D), de todas as combinações estudadas, a solução $ME_4$ (subcamadas $U_L66$ de 2 mm e $U_s22$ de 8/4 mm) é a mais eficiente com um $\Delta L_{w,}D_{NN}$ de 21,6 dB (figura 4 esq.).

Para este revestimento final, verifica-se um acréscimo de 3,2 dB quando se aplica o sistema duplo flutuante mais eficaz em detrimento da laje flutuante correspondente (melhor solução que o melhor dos pavimentos flutuantes. Este acréscimo é significativo, uma vez que diminui para "metade" o ruído que se iria sentir com o sistema de laje flutuante (L). A solução de pavimento flutuante (P) mais eficaz iria aumentar o ruído de percussão sentido para o "dobro" ($\Delta L_{w,}L_{NN}$ - $\Delta L_{w,}P_{NN}$ = 19,1 – 16,3 = 2,8 dB) (quadro 4) relativamente ao sistema com maior eficácia de laje flutuante, logo o primeiro não será de todo a melhor solução.

Todas as combinações de sistema duplo flutuante (D) ensaiadas, tendo como revestimento final madeira de encaixe (ME), revelam ser uma solução mais eficaz que a melhor das soluções respectivas individualizadas (em todos os casos é a laje flutuante), obtendo um acréscimo ($\Delta\Delta L_w$ NN) que varia de 0,4 a 3,2 dB.

- Quando o revestimento final é a madeira (M) e se o sistema flutuante pretendido for o de pavimento flutuante (P), a melhor solução, apesar de não se destacar significativamente das restantes (0,1 e 0,6 dB) é a subcamada $U_L66$ de 2 mm (a subcamada com menor espessura das ensaiadas). Quando se trata de um sistema de laje flutuante, a subcamada mais eficaz é a

$U_s$85 de 6/3 mm, com uma *Eficácia* de 23,1 dB. Contudo, esta subcamada não incorpora o sistema duplo flutuante com melhor desempenho ($\Delta L_{w,}D_{NN}$ = 23,8 dB), mas sim as subcamadas $U_L$22 de 3 mm e $U_s$22 de 6/3 mm ($M_3$).

Neste caso, em que revestimento final é madeira (não de encaixe), a vantagem entre um sistema de laje flutuante (L) e o duplo flutuante (D) respectivo nem sempre existe (fig. 4 dir.). Em algumas situações adoptar um sistema duplo flutuante não resulta num acréscimo de eficácia mas numa diminuição, podendo atingir valores de -1,9 dB. O maior ganho de *Eficácia* verificado é de 1,7 dB. Note-se, no entanto que apesar de alguns sistemas duplo flutuantes serem mais vantajosos, como o caso do mais eficaz, em 1,7 dB relativamente à laje flutuante respectiva, quando comparado com o melhor dos sistemas de laje flutuante, o acréscimo é somente de 0,7 dB ($m\Delta\Delta L_w$ NN = (23,8 – 23,1) dB).

- Quando o revestimento final é cerâmico (C) e se o sistema flutuante pretendido for o de pavimento flutuante (P), a melhor opção para *underlay* é, novamente, a subcamada $U_L$66, embora que com uma diferença de 0,3 dB (face à subcamada $U_L$61). Com isto, e uma vez que a subcamada mais eficaz tem menor espessura (2 *vs* 5 mm) poderá concluir-se que o aumento de espessura não resulta forçosamente num aumento de eficácia. Como *underscreed* e considerando uma situação de laje flutuante (L), a opção mais vantajosa é a aplicação do $U_s$22 com uma espessura de 6/3 mm ($\Delta L_{w,}L_{NN}$ = 20,4 dB). Este mesmo *underscreed*, em combinação com o *underlay* $U_L$66, resultam na melhor solução ($C_4$) a apresentar como sistema duplo flutuante (D), acrescendo 2 dB à *Eficácia* obtida com a solução da laje flutuante (L) referida.
Todas as quatro combinações de sistemas duplo flutuantes ($C_1$, $C_2$, $C_3$ e $C_4$) são mais eficazes que os respectivos sistemas de laje flutuante variando o acréscimo de *Eficácia* de 0,3 a 2,0 dB, tendo-se verificado o maior acréscimo quando o *underscreed* do sistema de laje flutuante mais eficaz incorpora também o sistema duplo flutuante.

Quanto aos pavimentos flutuantes (P), continuam a demonstrar serem os menos eficazes dos sistemas flutuantes estudados.

- Quando o revestimento final é vinil (V) e se o sistema flutuante pretendido for o de pavimento flutuante (P), o $U_L$66 deixa de ser a melhor opção, uma vez que o $U_L$85, com menor espessura (2 *vs* 1,6 mm), atinge melhor *Eficácia* (+0,7 dB), logo a melhor solução para aplicar num pavimento flutuante (P). Para um sistema de laje flutuante (L), a melhor solução é o *underscreed* $U_s$22 com 4/2 mm, obtendo um desempenho de 32,0 dB. Quanto ao sistema duplo flutuante (D), a solução $V_4$ é a mais eficaz, embora com diferença de 0,1 dB da combinação $V_1$. Em ambas as combinações referidas o *underscreed* utilizado é o $U_s$22 de 4/2 mm, o *underlay* aplicado é que difere, sendo a solução mais eficaz, neste caso, composta pelas subcamadas que incorporam os sistemas de pavimento e laje flutuante mais eficazes.

Quando o revestimento final é o vinil, todos os sistemas de laje flutuante são mais eficazes que os sistemas duplo flutuantes correspondentes, tendo sido a variação de Eficácia ($\Delta\Delta L_{w,}$NN) verificada entre ambos os sistemas de -0,2 a -0,8 dB.

Posto isto, podem resumir-se no quadro 5 as melhores soluções de pavimento, laje e duplo flutuante, para cada revestimento final e verificar-se que em qualquer revestimento final (dos considerados neste estudo, excepto no vinil), a aplicação da subcamada $U_L$66 de 2 mm é a mais eficaz numa situação em que o sistema pretendido é de pavimento flutuante (P) e que num sistema de laje flutuante (L), em qualquer dos revestimentos à excepção da madeira, a subcamada mais eficaz é a $U_s$22 (aglomerado composto de borracha reciclada).

Quanto à situação de sistema duplo flutuante, verifica-se uma padronização quanto ao tipo de *underscreed* mais eficaz nesse mesmo sistema, sendo em todos os casos de revestimento final, o $U_s$22. Não obstante, o material que constitui a subcamada mais eficaz em laje flutuante, exceptuando na combinação em que o revestimento final é madeira (M) é, igualmente, a com melhor desempenho num sistema duplo flutuante (D).

Quanto aos sistemas flutuantes mais eficientes, pôde comprovar-se a grande eficiência de um sistema de laje flutuante (L) em detrimento do pavimento flutuante (P), sendo a diferença (não-normativa) entre *Eficácias* máxima dos sistemas referidos de: 2,8 dB quando o revestimento final é madeira de encaixe (ME); 7,3 dB no caso de ser madeira (M); 5,8 dB para cerâmico (C) e 12,5 dB se vinil (V). Relativamente ao sistema duplo flutuante (D) em detrimento da laje flutuante (L), aquela opção parece ser, na maioria dos casos, mais eficaz com melhoramento de desempenho de 0,7 a 2,5 dB.

Quadro 5 – Resumo, em função do revestimento final, das soluções de sistemas flutuantes (pavimento P, laje L e duplo flutuante D) mais eficazes e seus desempenhos em valores não normativos (NN), em que: * Subcamada resiliente perfilada com espessura x/y – com ondulações em que a maior espessura é x e a menor y mm.

| **Sistema flutuante** | **Pavimento (P)** | | **Laje (L)** | | **Duplo flutuante (D)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revestimento final** | **$U_L$ esp.** | **$\Delta L_{w,P_{NN}}$ (dB)** | **$U_s$ esp.** | **$\Delta L_{w,L_{NN}}$ (dB)** | **$U_L$ esp.** | **$U_s$ esp.** | **$\Delta L_{w,D_{NN}}$ (dB)** | **$m\Delta\Delta L_w NN$ (dB)** |
| Madeira de Encaixe (ME) | $U_L$66 2 mm | 16,3 | $U_s$22 6/3 mm | 19,1 | $U_L$66 2 mm | $U_s$22 8/4 mm* | 21,6 | +2,5 |
| Madeira (M) | $U_L$66 2 mm | 15,8 | $U_s$85 6/3 mm* | 23,1 | $U_L$22 3 mm | $U_s$22 6/3 mm* | 23,8 | +0,7 |
| Cerâmico (C) | $U_L$66 2 mm | 14,6 | $U_s$22 6/3 mm* | 20,4 | $U_L$66 2 mm | $U_s$22 6/3 mm* | 22,4 | +2,0 |
| Vinil (V) | $U_L$85 1,6 mm | 19,5 | $U_s$22 4/2 mm* | 32,0 | $U_L$85 1,6 mm | $U_s$22 4/2 mm* | 31,8 | -0,2 |

## Referências bibliográficas

[1] Mateus, C. *Desenvolvimento de solução combinada de aglomerados com cortiça para subcamadas de revestimento e de lajeta com comportamento acústico optimizado*, Dissertação M.Sc. Engª Civil, FEUP, 2015.

[2] NP EN ISO 140-8: 2008 *"Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção - Parte 8: Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimento de piso em pavimento normalizado".*

[3] NP EN ISO 717-2: 2013 *"Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção - Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão".*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE REHABILITACIÓN POR EL EXTERIOR DE LA FACHADA
## Comparación de prestaciones acústicas
## Soluciones con cámara ventilada y diferentes productos aislantes

PACS: 43.55.Ti

Rodero Antunez, Carlos (Comité Técnico AFELMA)

**RESUMEN**

Para la rehabilitación Térmica y Acústica de un edificio, es frecuente la solución de utilizar una fachada ventilada con un acabado que permita el cambio del aspecto exterior del mismo.

La solución permite la utilización de cualquier producto aislante con marcado CE presente en el mercado por lo que se considera una gama de soluciones muy flexible. El presente trabajo ha sido realizado por Técnicos de AFELMA (Asociación de Fabricantes Españoles de Lanas Minerales).

Las soluciones de aislamiento térmico por el exterior, realizadas con lanas minerales mejoran considerablemente el aislamiento acústico del muro inicial. Las lanas minerales, debido a su estructura flexible y de poro abierto, presentan un elevado porcentaje de hueco y un bajo módulo de rigidez dinámica.

En este trabajo se presentan los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo, en laboratorio, obtenidos sobre un muro de fachada portador y dos productos aislantes diferentes en una solución de cámara ventilada con el objetivo de comprobar las diferencias en comportamiento acústico (aislamiento a ruido aéreo).

**INTRODUCCIÓN**

La exigencia de calidad en las viviendas constituye una demanda social, el acelerado cambio climático y el irreversible encarecimiento de las energías no renovables obligan a revisar la actividad de todos los colectivos y agentes sociales implicados en la edificación.

En este contexto, la actividad arquitectónica y urbanística deberá sustentarse en principios básicos como la calidad, el ahorro energético y la optimización de los recursos que utilizamos.

Siendo el sector de la edificación uno de los principales sectores económicos, con evidentes repercusiones en el conjunto de la sociedad, la Ley de Ordenación de la Edificación, LOE, aprobada en 1999, propuso como objetivo mejorar la calidad de la edificación en respuesta a una demanda creciente por parte de la sociedad. Respondiendo a este orden de principios, estableció el marco general para fomentar la calidad de los edificios y dar garantías suficientes a los usuarios frente a los daños en sus viviendas, estableciendo los requisitos básicos que deben satisfacer todas las construcciones, que son el núcleo central de la regulación del Código Técnico de la Edificación, CTE.

El CTE ha supuesto la mayor reforma normativa del sector de la edificación en los últimos 30 años, y su objetivo esencial es hacer edificios más seguros, más habitables y más sostenibles, pero también fomenta la innovación, desarrollando nuevas tecnologías en el sector, incrementado la productividad y mejorando la competitividad de las empresas.

Los distintos sistemas de mejora de la envolvente térmica colocando el aislamiento por el exterior en relación al muro portador en fachadas, (sistema SATE o los de Cámara Ventilada), están especialmente

recomendados para conseguir un óptimo aislamiento térmico. Esto se debe a que al realizar el aislamiento térmico por el exterior, estos sistemas dotan al edificio de una envolvente térmica continua evitando de esta forma la aparición de puentes térmicos.

En el caso de aplicar cualquiera de los sistemas por el exterior a la rehabilitación de edificios, estos permiten ser realizados sin tener que desalojar las viviendas.

Los sistemas realizados con lanas minerales como material aislante, además de aislamiento térmico, proporcionan una importante mejora en el aislamiento acústico a ruido aéreo del muro inicial.

Por otra parte, el ruido cotidiano ha empezado a considerarse socialmente como una fuente importante de posibles trastornos para la salud. Este hecho, unido a la reciente entrada en vigor del "**Documento básico de protección frente al ruido, DB-HR", en abril de 2009,** donde se introducen unos mínimos mucho más exigentes para el aislamiento acústico en los edificios, hace necesario promover actividades de desarrollo tecnológicas enfocadas a obtener nuevos productos y/o sistemas que resuelvan la problemática planteada.

Teniendo en cuenta las excelentes propiedades térmicas y acústicas de las lanas minerales, los miembros de AFELMA han desarrollado productos para los sistemas con cámara ventilada que aportan el aislamiento térmico necesario al edifico, y a la vez dotan al mismo, de un excelente aislamiento acústico frente al ruido externo.

Los productos de base en lana mineral han sido especialmente desarrollados para este tipo de soluciones cumpliendo con todos los requisitos indicados y controlados en su marcado CE.

En este trabajo se presentan los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo, en laboratorio, obtenidos sobre un muro de fachada, utilizando como materiales aislante paneles de Lana Mineral especialmente diseñada para esta aplicación y un aislante constituido in situ por proyección de Poliuretano (PUR).

Este estudio se realiza en un marco que busca diseñar nuevos productos y sistemas constructivos de altas prestaciones acústicas que tengan aplicación directa y específica en la construcción de edificios, así como en su diseño integral, sin descuidar otros requisitos de producto.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Los ensayos van encaminados a caracterizar el aislamiento acústico a ruido aéreo que presenta el sistema de aislamiento térmico exterior de fachada con cámara ventilada, al ser colocado sobre un muro de ladrillo portador al que se añade aislamiento, con paneles aislantes de lanas mineral (MW) y con un aislamiento constituido in situ por proyección de poliuretano(PUR).

Los ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo se han realizado aplicando las normas:

- Anexo G de la norma UNE-EN ISO 10140-1:2011 (revestimientos Acústicos. Mejora del aislamiento a ruido aéreo).
- UNE-EN ISO 10140-2:2011 (Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción).
- Anexo B de la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011 (Elementos Básicos Normalizados para medir la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo mediante revestimientos).
- Anexo E del Documento Básico DB HR Protección Frente al Ruido. Abril 2009.

Se han seguido asimismo los procedimientos de medida y los cálculos expuestos en los procedimientos de ensayo PE-36-ENAC y PE-38-ENAC del Laboratorio de Acústica de Audiotec.

Como procedimiento en la secuencia de los ensayos, primero se realizó el ensayo del "elemento básico" (muro portador) y en segundo lugar se ensayó el sistema formado por el "elemento básico + revestimiento complementario".

Este procedimiento asegura la perfecta comparación de prestaciones entre las diferentes elecciones de productos aislantes.

Los ensayos se han realizado en las cámaras de ensayo normalizadas de Audiotec situadas en las parcelas 28 y 30 del Parque Tecnológico de Boecillo en Valladolid.

**Descripción de las muestras de ensayo**

**Identificación del revestimiento:**

**Revestimiento de aislamiento exterior con placa cementicia + lana mineral, sobre tabique de fábrica de 1/2 pie cara vista. Cámara de aire ventilada.**

**Cerramiento portador:** 12 mm de yeso + tabique de fábrica de 1/2 pie de ladrillo cara vista (24x5x12 cm), con un peso de 216 kg/m2 +

**Revestimiento de interior a exterior:** lana mineral de 80 mm de espesor fijada mecánicamente al muro base mediante espigas IZ-P 10x120 mm + cámara ventilada de aire de 50 mm + placa cementicia de 8 mm de espesor adherida mediante cinta de espuma de polietileno de 3 mm y masilla adhesiva elástica a una estructura metálica compuesta por perfiles de aluminio verticales "T" (110x50x2 mm) anclados al muro base mediante escuadras de aluminio.

Nota 1: junta horizontal de 9 mm de separación entre placas.

Nota 2: junta vertical de 10 mm de separación entre placas.

**Espesor del sistema:** Cerramiento portador 13,2 cm + revestimiento 14,1 cm = 27,3 cm.

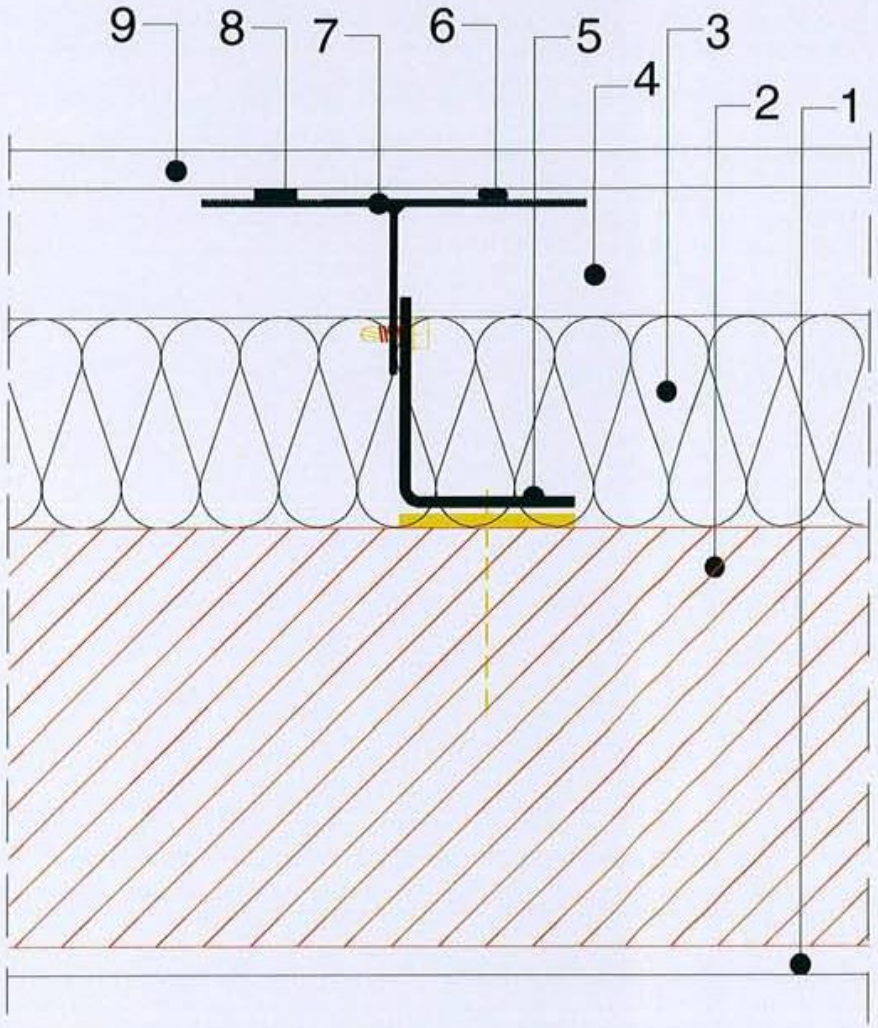
Las dimensiones de la apertura de medida son 3,6m de ancho por 2,8m de alto. La superficie total de la muestra es de 10,08 $m^2$.

La muestra ensayada fue instalada por operarios de Audiotec y de Afelma, bajo la supervisión de técnicos de AUDIOTEC.

- **Identificación de los productos utilizados en la construcción de la muestra:**

  - Ladrillo Perforado Cara Vista de dimensiones (24 x 5 x 12 cm.).
  - Mortero de cemento para la instalación del ladrillo.
  - Yeso para el enlucido.
  - Lana mineral de 80 mm con una resistividad al flujo de aire r≥5 kPa.s/$m^2$.
  - Espigas IZ-P 10x120 mm para fijar mecánicamente la lana mineral.
  - Cámara de aire de 50 mm.
  - Escuadras de aluminio.
  - Perfiles de aluminio “T" (110x50x2 mm).
  - Masilla adhesiva elástica a base de poliuretano monocomponente.
  - Cinta adhesiva de doble cara de espuma de polietileno (ancho: 12 mm; espesor: 3 mm). Adhesiva dos caras.
  - Placa cementicia de 8 mm de espesor.
  - Tornillería.

- **Croquis de la muestra (sección en planta):**




| Referencia | Material |
|---|---|
| 1 | Guarnecido de yeso de 12 mm. |
| 2 | Ladrillo Perforado Cara Vista de dimensiones (24 x 5 x 12 cm.). |
| 3 | Lana mineral de 80 mm con una resistividad al flujo de aire $r \geq 5$ kPa.s/m$^2$. |
| 4 | Cámara de aire de 70 mm. |
| 5 | Escuadras de aluminio. |
| 6 | Cordón de masilla adhesiva elástica. |
| 7 | Perfiles de aluminio "T" (110x50x2 mm). |
| 8 | Cinta adhesiva de espuma de polietileno. Adhesiva dos caras. |
| 9 | Placa cementicia de 8 mm de espesor. |

- **Proceso de instalación de la muestra:**

En un portamuestras se construyó el cerramiento con una fábrica de ½ pie de ladrillo perforado cara vista, sin interponer ninguna junta elástica entre el portamuestras y el tabique. El montaje se realizó con junta continua de mortero en las juntas horizontal y vertical.

Posteriormente se aplicaron 12 mm de yeso por la cara interior.

Una vez terminado y secado el cerramiento portador, se realizó el ensayo y a posteriori se procedió a instalar el revestimiento de aislamiento exterior.

En primer lugar, se fijaron con tacos de golpe sobre la cara exterior del cerramiento portador las escuadras de aluminio.

A continuación se instalaron los paneles de lana mineral de 80 mm fijándolos mecánicamente al portador mediante espigas IZ-P 10x120 mm.

Se atornillaron a las escuadras los perfiles verticales de aluminio "T" (110x50x2 mm) sobre los cuáles se fijó mediante adhesivo para paneles y cinta de espuma de polietileno de 3 mm, una capa de placas cementicias de 8 mm de espesor y dimensiones 1180 x 549 mm dejando una cámara de aire de 50 mm de espesor entre la placa y la lana. Se dejó una junta horizontal de 9 mm y otra de 10 mm de separación entre placas.

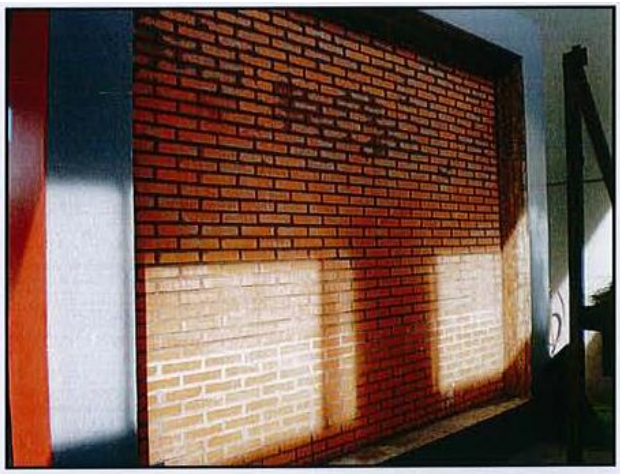
El espesor final de la muestra fue de 27 cm, correspondiendo 13,2 cm al cerramiento portador y 13,8 cm al revestimiento.

La masa superficial del cerramiento portador fue de 216 kg/m$^2$ y la del revestimiento de 17,6 kg/m$^2$, dando una masa total aproximada de 234 kg/m$^2$.

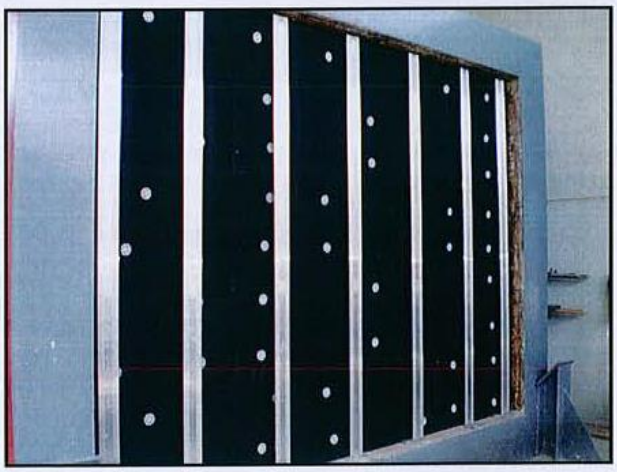
Las dimensiones de la apertura de medida son 3,6m de ancho por 2,8m de alto. La superficie total de la muestra es de 10,08 m$^2$.

La muestra ensayada fue instalada por operarios de Audiotec y de Afelma, bajo la supervisión de técnicos de AUDIOTEC.

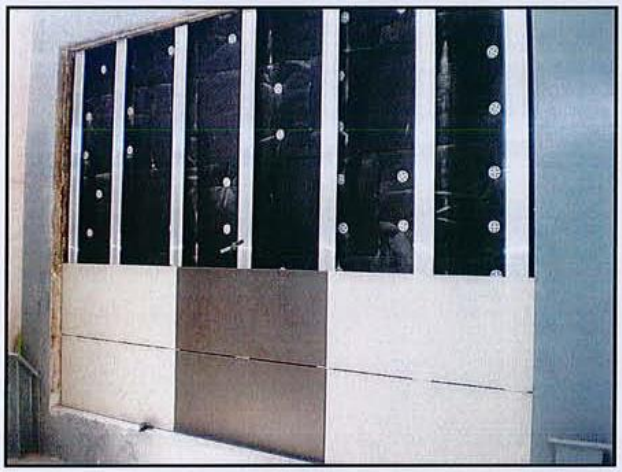
El volumen de la cámara emisora es de 60,61 m$^3$ y el de la cámara receptora de 50,76 m$^3$.















- **Proceso de instalación de la muestra:**

En un portamuestras se construyó el cerramiento con una fábrica de ½ pie de ladrillo perforado cara vista, sin interponer ninguna junta elástica entre el portamuestras y el tabique. El montaje se realizó con junta continua de mortero en las juntas horizontal y vertical.

Posteriormente se aplicaron 12 mm de yeso por la cara interior.

Una vez terminado y secado el cerramiento portador, se realizó el ensayo y a posteriori se procedió a instalar el revestimiento de aislamiento exterior.

En primer lugar, se fijaron con tacos de golpe sobre la cara exterior del cerramiento portador las escuadras de aluminio.

A continuación se realizó la proyección de poliuretano (e=60 mm) sobre la cara exterior del cerramiento portador.

Una vez había secado el poliuretano, se atornillaron a las escuadras los perfiles verticales de aluminio "T" (110x50x2 mm) sobre los cuáles se fijó mediante adhesivo para paneles y cinta de espuma de polietileno de 3 mm, una capa de placas cementicias de 8 mm de espesor y dimensiones 1180 x 549 mm dejando una cámara de aire de 70 mm de espesor entre la placa y el poliuretano. Se dejó una junta horizontal de 9 mm y otra de 10 mm de separación entre placas.

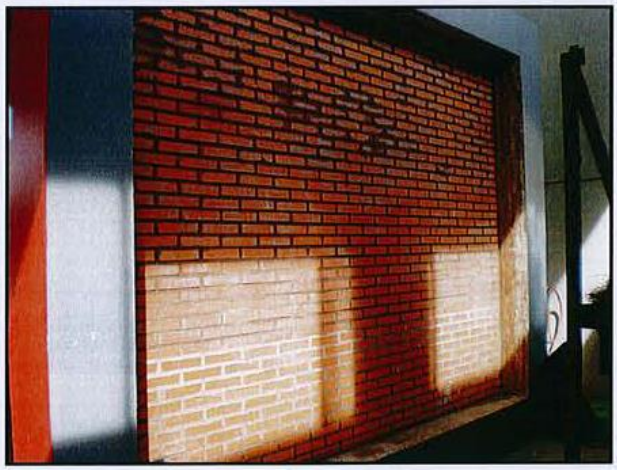
El espesor final de la muestra fue de 27,3 cm, correspondiendo 13,2 cm al cerramiento portador y 14,1 cm al revestimiento.

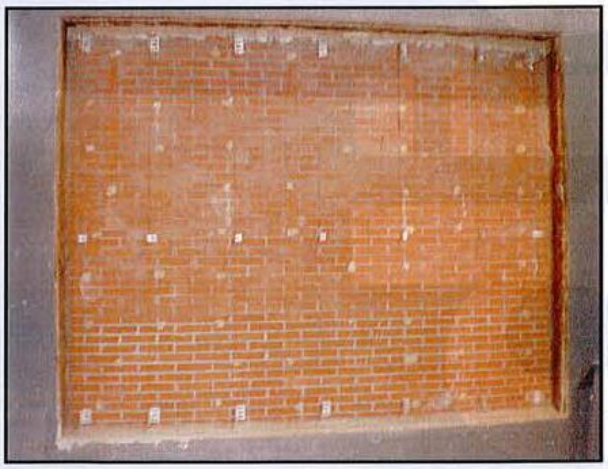
La masa superficial del cerramiento portador fue de 216 kg/m$^2$ y la del revestimiento de 17,1 kg/m$^2$, dando una masa total aproximada de 233 kg/m$^2$.

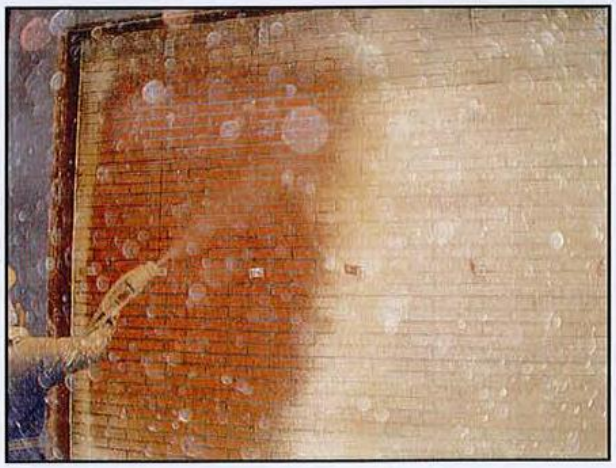
Las dimensiones de la apertura de medida son 3,6m de ancho por 2,8m de alto. La superficie total de la muestra es de 10,08 m$^2$.

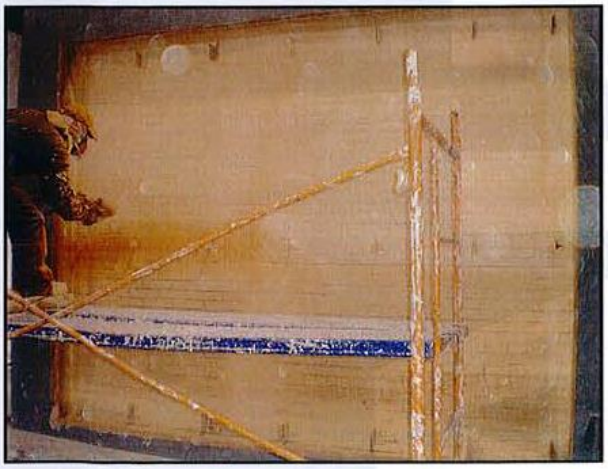
La muestra ensayada fue instalada por operarios de Audiotec y de Afelma, bajo la supervisión de técnicos de AUDIOTEC.

Solución con proyección de PUR

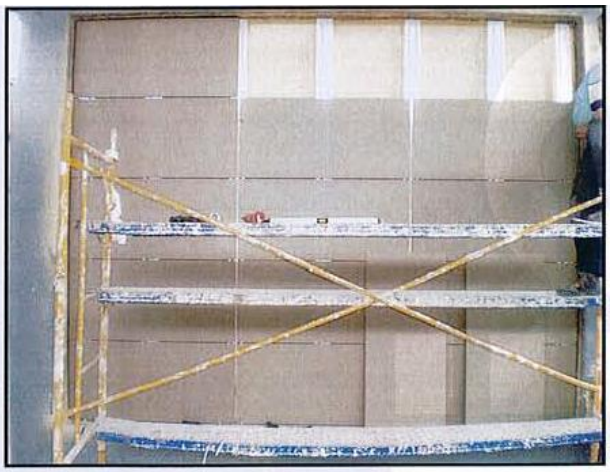


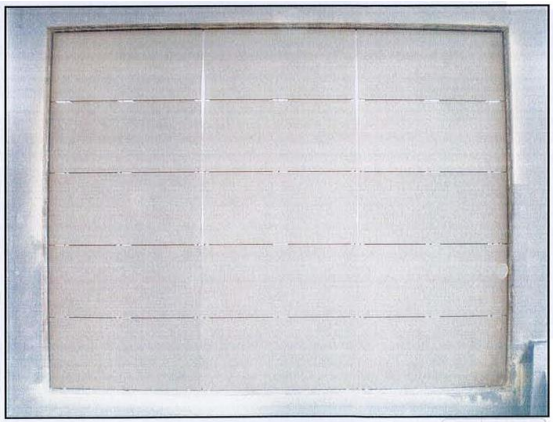








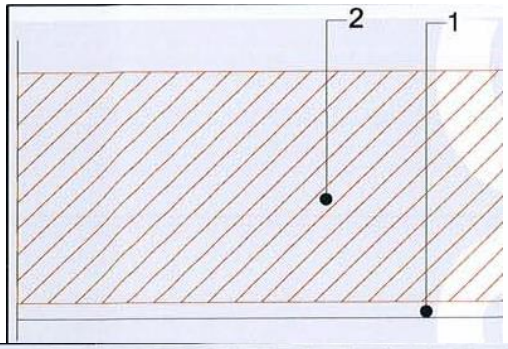




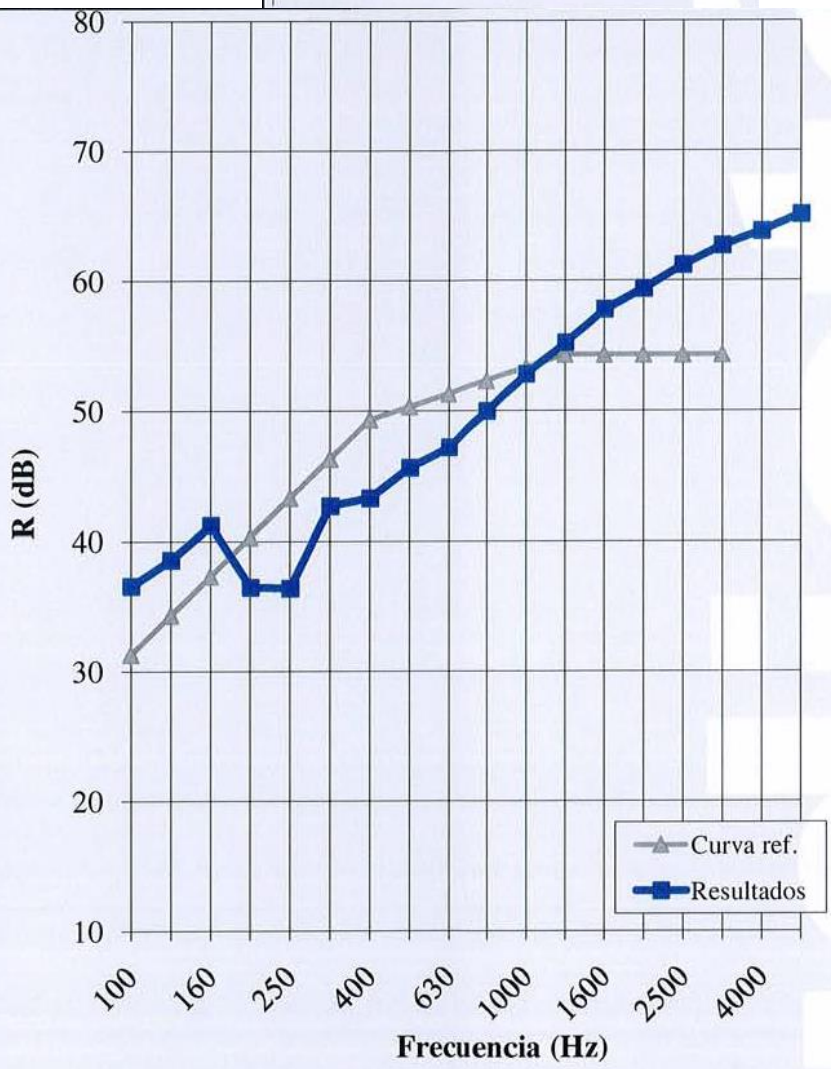
## Resultados

**Identificación de la muestra:**
Tabique de fábrica de 1/2 pie de ladrillo cara vista (24x5x12 cm) [2] con enlucido de yeso de 12 mm [1] sobre una cara.

**Espesor Total: 13,2 cm.**
**Masa superficial: 216 kg/m².**




| *Frec. f Hz* | R dB |
|---|---|
| *100* | **36,6** |
| *125* | **38,6** |
| *160* | **41,2** |
| *200* | **36,5** |
| *250* | **36,4** |
| *315* | **42,7** |
| *400* | **43,3** |
| *500* | **45,6** |
| *630* | **47,2** |
| *800* | **50,0** |
| *1000* | **52,8** |
| *1250* | **55,2** |
| *1600* | **57,8** |
| *2000* | **59,4** |
| *2500* | **61,2** |
| *3150* | **62,7** |
| *4000* | **63,8** |
| *5000* | **65,1** |

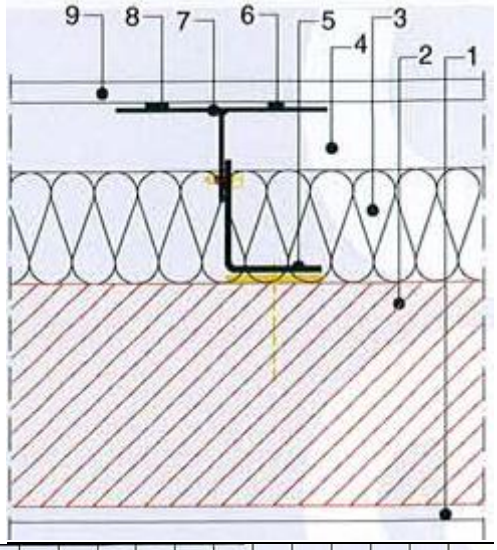



Aislamiento global calculado según la Norma ISO 717-1:2013:
Rw (C ; Ctr) = 50,3 ( -1 ; -5 ) dB
Aislamiento global en dBA según el DB-HR.
R(A) = 49,7 dBA
Aislamiento global en dBA, para ruido exterior dominante de automóviles.
R(Atr) = 45,5 dBA

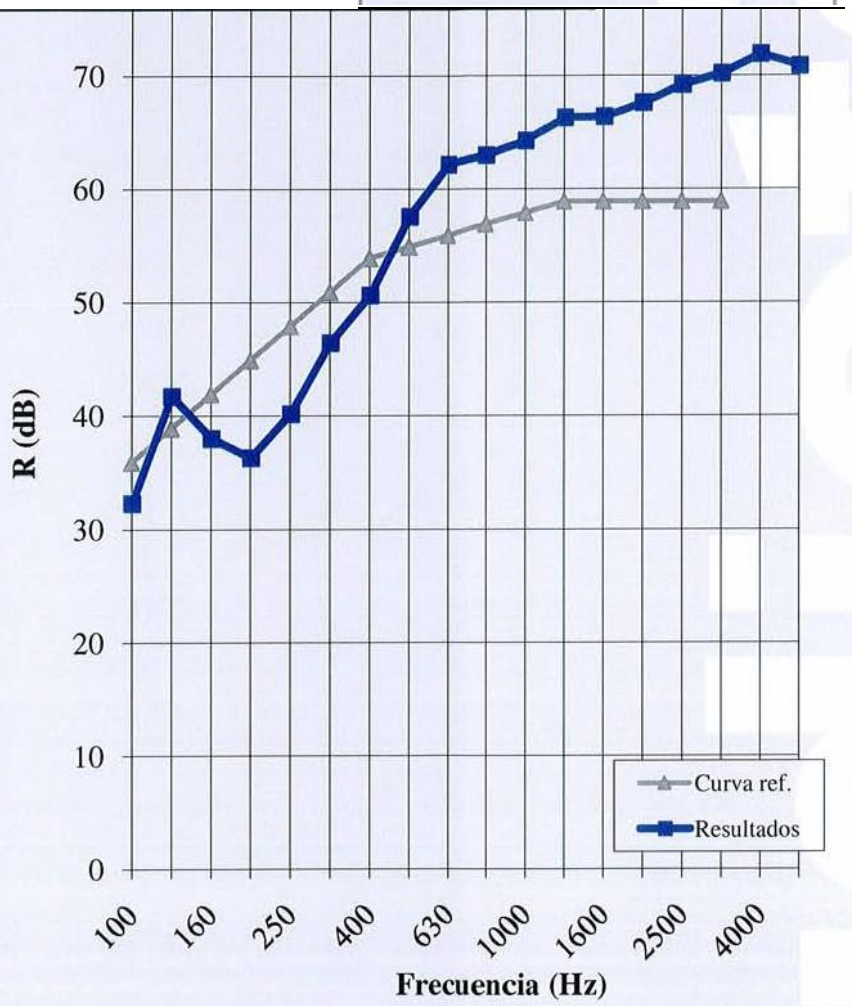
Audiotec
Ingeniería y Control del Ruido

## Elemento Básico o muro portador

**Identificación de la muestra:**
12 mm de yeso [1] + tabique de fábrica de 1/2 pie de ladrillo cara vista (24x5x12 cm) [2] + lana mineral de 80 mm de espesor fijada mecánicamente al muro base mediante espigas IZ-P 10x120 mm [3] + cámara ventilada de aire de 50 mm [4] + placa cementicia de 8 mm de espesor y dimensiones 1180 x 549 mm [9], adherida mediante cinta de espuma de polietileno de 3 mm [8] y masilla adhesiva elástica [6] a una estructura metálica compuesta por perfiles de aluminio verticales "T" (110x50x2 mm) [7] anclados al muro base mediante escuadras de aluminio [5].
Nota 1: junta horizontal de 9 mm de separación entre placas.
Nota 2: junta vertical de 10 mm de separación entre placas.
**Espesor Total: 27,3 cm.** **Masa superficial: 234 kg/m².**



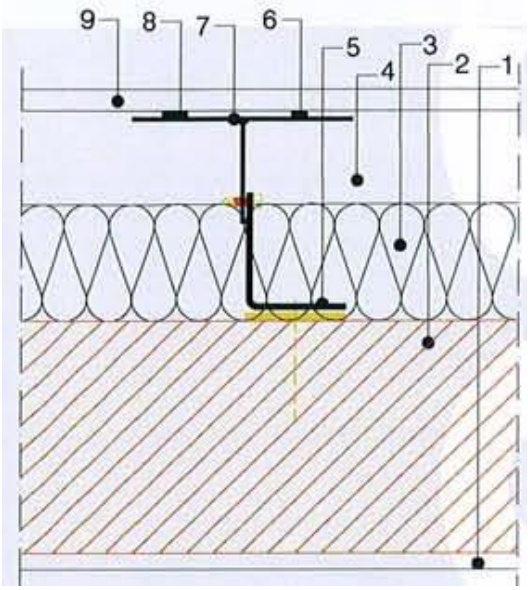

| Frec. f Hz | R dB |
|---|---|
| 100 | 32,3 |
| 125 | 41,7 |
| 160 | 38,0 |
| 200 | 36,3 |
| 250 | 40,2 |
| 315 | 46,4 |
| 400 | 50,6 |
| 500 | 57,6 |
| 630 | 62,2 |
| 800 | 63,0 |
| 1000 | 64,3 |
| 1250 | 66,3 |
| 1600 | 66,4 |
| 2000 | 67,6 |
| 2500 | ≥ 69,2 |
| 3150 | ≥ 70,2 |
| 4000 | ≥ 71,9 |
| 5000 | ≥ 70,8 |



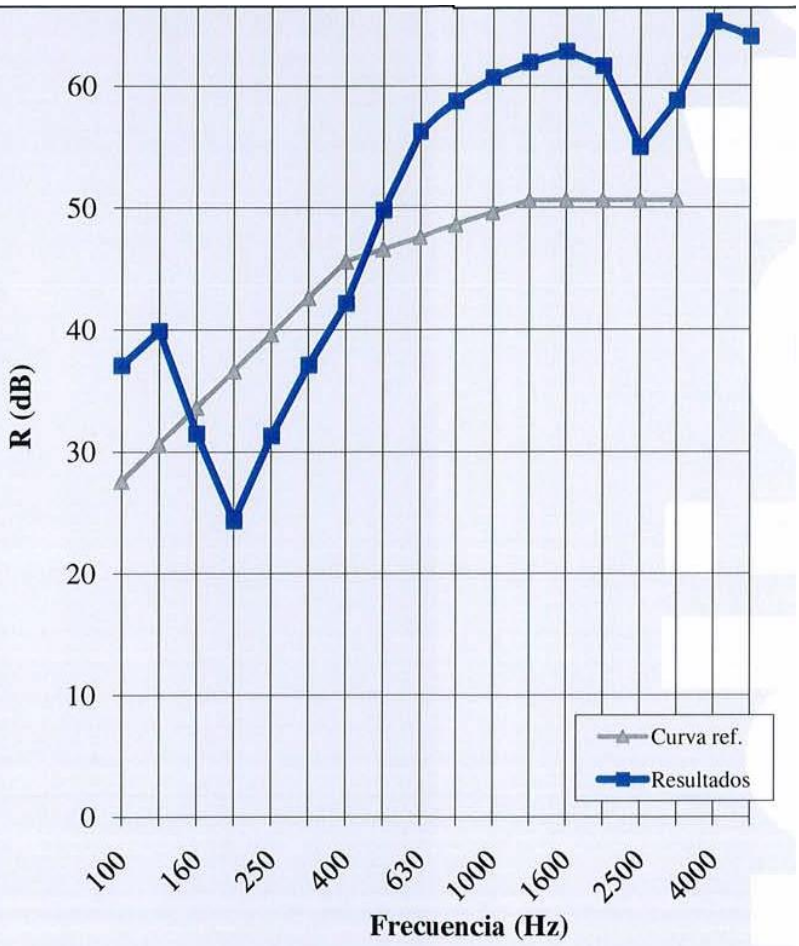

Aislamiento global calculado según la Norma ISO 717-1:2013:
Rw (C ; Ctr) = 54,9 ( -3 ; -8 ) dB
Aislamiento global en dBA según el DB-HR.
R(A) = 53,2 dBA
Aislamiento global en dBA, para ruido exterior dominante de automóviles.
R(Atr) = 47,1 dBA

Audiotec
Ingeniería y Control del Ruido

**Identificación de la muestra:**
12 mm de yeso [1] + tabique de fábrica de 1/2 pie de ladrillo cara vista (24x5x12 cm) [2] + poliuretano proyectado de 60 mm de espesor [3] + cámara ventilada de aire de 70 mm [4] + placa cementicia de 8 mm de espesor y dimensiones 1180 x 549 mm [9], adherida mediante cinta de espuma de polietileno de 3 mm [8] y masilla adhesiva elástica [6] a una estructura metálica compuesta por perfiles de aluminio verticales "T" (110x50x2 mm) [7] anclados al muro base mediante escuadras de aluminio [5].
Nota 1: junta horizontal de 9 mm de separación entre placas.
Nota 2: junta vertical de 10 mm de separación entre placas.
**Espesor Total: 27,3 cm.** **Masa superficial: 233 kg/m².**




| *Frec. f Hz* | R dB |
|---|---|
| *100* | **37,1** |
| *125* | **39,9** |
| *160* | **31,5** |
| *200* | **24,4** |
| *250* | **31,3** |
| *315* | **37,1** |
| *400* | **42,1** |
| *500* | **49,8** |
| *630* | **56,3** |
| *800* | **58,8** |
| *1000* | **60,7** |
| *1250* | **61,9** |
| *1600* | **62,8** |
| *2000* | **61,6** |
| *2500* | **55,0** |
| *3150* | **58,8** |
| *4000* | **65,2** |
| *5000* | **64,0** |

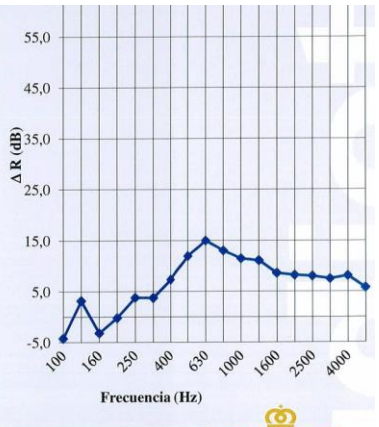



Aislamiento global calculado según la Norma ISO 717-1:2013:
Rw (C ; Ctr) = 46,6 ( -4 ; -8 ) dB
Aislamiento global en dBA según el DB-HR.
R(A) = 43,8 dBA
Aislamiento global en dBA, para ruido exterior dominante de automóviles.
R(Atr) = 38,5 dBA

Audiotec
Ingeniería y Control del Ruido

**Resultados**
**Comparativos en mejora sobre portador**

| Frec. f Hz | Rcon dB | Rsin dB | ΔR dB |
|---|---|---|---|
| 100 | 32,3 | 36,6 | -4,2 |
| 125 | 41,7 | 38,6 | 3,2 |
| 160 | 38,0 | 41,2 | -3,2 |
| 200 | 36,3 | 36,5 | -0,2 |
| 250 | 40,2 | 36,4 | 3,8 |
| 315 | 46,4 | 42,7 | 3,7 |
| 400 | 50,6 | 43,3 | 7,3 |
| 500 | 57,6 | 45,6 | 11,9 |
| 630 | 62,2 | 47,2 | 15,0 |
| 800 | 63,0 | 50,0 | 13,0 |
| 1000 | 64,3 | 52,8 | 11,5 |
| 1250 | 66,3 | 55,2 | 11,1 |
| 1600 | 66,4 | 57,8 | 8,6 |
| 2000 | 67,6 | 59,4 | 8,2 |
| 2500 | 69,2 | 61,2 | 8,0 |
| 3150 | 70,2 | 62,7 | 7,5 |
| 4000 | 71,9 | 63,8 | 8,1 |
| 5000 | 70,8 | 65,1 | 5,8 |

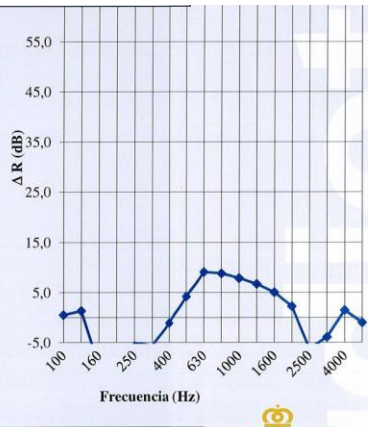



| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rw ( C , Ctr ) sin = | 50 | ( -1 ; -5 ) | dB |
| Rw ( C , Ctr ) con = | 55 | ( -2 ; -8 ) | dB |

ENAC ENSAYOS Nº 149/LE367

$$\Delta Rw_{direct} = 5 \text{ dB}$$

| Frec. f Hz | Rcon dB | Rsin dB | ΔR dB |
|---|---|---|---|
| 100 | 37,1 | 36,6 | 0,5 |
| 125 | 39,9 | 38,6 | 1,3 |
| 160 | 31,5 | 41,2 | -9,7 |
| 200 | 24,4 | 36,5 | -12,1 |
| 250 | 31,3 | 36,4 | -5,1 |
| 315 | 37,1 | 42,7 | -5,6 |
| 400 | 42,1 | 43,3 | -1,1 |
| 500 | 49,8 | 45,6 | 4,2 |
| 630 | 56,3 | 47,2 | 9,1 |
| 800 | 58,8 | 50,0 | 8,8 |
| 1000 | 60,7 | 52,8 | 7,9 |
| 1250 | 61,9 | 55,2 | 6,7 |
| 1600 | 62,8 | 57,8 | 5,0 |
| 2000 | 61,6 | 59,4 | 2,2 |
| 2500 | 55,0 | 61,2 | -6,2 |
| 3150 | 58,8 | 62,7 | -3,9 |
| 4000 | 65,2 | 63,8 | 1,4 |
| 5000 | 64,0 | 65,1 | -1,0 |




| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Rw ( C , Ctr ) sin = | 50 | ( -1 ; -5 ) | dB |
| Rw ( C , Ctr ) con = | 47 | ( -3 ; -8 ) | dB |

ENAC ENSAYOS Nº 149/LE367

$$\Delta Rw_{direct} = -3 \text{ dB}$$

**CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos, indican que los sistemas de aislamientos térmicos por el exterior con cámara ventilada realizados con lana mineral mejoran el aislamiento acústico respecto a la fachada inicial y respecto a sistemas realizados con Proyección de Poliuretano (PUR) que por las características de rigidez del producto **empeoran** la prestación acústica inicial del portador, efecto que debe tenerse en cuenta en la elección del sistema de rehabilitación de la envolvente.
En este sentido, la política definida en el CTE relativa a la REHABILITACIÓN queda clara con el:

> • ***Criterio de no empeoramiento***
> *– En las intervenciones en los edificios existentes* ***no se podrán reducir las condiciones preexistentes*** *relacionadas con las exigencias básicas, cuando dichas condiciones sean menos exigentes que las establecidas en los documentos básicos del Código Técnico de la Edificación, salvo que en éstos se establezca un criterio distinto. Las que sean más exigentes, únicamente podrán reducirse hasta los niveles de exigencia que establecen los documentos básicos*

**REFERENCIAS**


[1] Documento Básico DB HR Protección Frente al Ruido. Abril 2009
[2] UNE-EN ISO 10140-1:2011 (revestimientos Acústicos. Mejora del aislamiento a ruido aéreo)
[3] UNE-EN ISO 10140-2:2011 (Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción)
[4] UNE-EN ISO 10140-5:2011 (Elementos Básicos Normalizados para medir la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo mediante revestimientos)



# Esto es mucho más que una roca. Es el sonido del silencio.

El aislamiento ROCKWOOL, elaborado con roca maciza, convierte tu hogar en un lugar agradable para vivir. Los sonidos pueden ser lo más bello del mundo, pero también pueden resultar molestos e indeseados. En casa suelo ensayar para preparar mis conciertos, y no puedo tocar y preocuparme por despertar a mis hijos al mismo tiempo. El aislamiento instalado dentro de nuestras paredes retiene la música en la habitación donde ensayo.

ROCKWOOL 4 en 1

**www.rockwool.es**

ROCKWOOL®
FIRESAFE INSULATION

**Irena Goudeva**
Profesional de música clásica, Bulgaria

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# EL IEE COMO ELEMENTO DESENCADENANTE DE LA REHABILITACIÓN

PACS no. 43.15.+s

Vega Catalán, Luis [(1)]; Carrascal García, Mª Teresa [(2)]; Romero Fernández, Amelia[(3)]; Casla Herguedas, Belén[(4)]; Eduardo González de Prado[(5)]

[(1)(5)] D. G. de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Secretaria de Estado de Infraestructuras, Trasporte y Vivienda. Ministerio de Fomento.
Pº de la Castellana, 67
28071 Madrid
Tfno: 91 597 77 11
[(1)] lvega@fomento.es; [(5)] egdeprado@fomento.es

[(2)(3)(4)] Unidad de Calidad en la Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc – CSIC
Serrano Galvache 4
28033 Madrid
Tfno: 91 302 04 40
[(2)] tcarrascal@ietcc.csic.es;[(3)] aromero@ietcc.csic.es;[(4)] belench@ietcc.csic.es

## ABSTRACT

Law 8/2013, of June 26, Rehabilitation, Regeneration and Urban Renewal Assessment Report Building (IEE) to try to ensure the quality and sustainability of the building stock is implanted, as well as get information that allows the government target the exercise of their own policies. The IEE also intended as an element of public awareness, which allows the user to know the status of the building on some basic building requirements and identify potential for improvement, guiding the possible rehabilitation of the same. Acoustics, as polls show, is one of the problems that most concern users and has therefore been included, on a voluntary basis, in the IEE.

## RESUMEN

La Ley 8/2013, de 26 de junio, de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas se implanta el Informe de Evaluación del Edificio (IEE) para tratar de asegurar la calidad y sostenibilidad del parque edificado, así como obtener información que permita al gobierno orientar el ejercicio de sus propias políticas. El IEE pretende asimismo ser un elemento de concienciación ciudadana, que permita al usuario conocer el estado del edificio en relación con algunos requisitos básicos de la edificación e identificar el potencial de mejora, orientándole en la posible rehabilitación del mismo. La acústica, como demuestran las encuestas, es uno de los problemas que más preocupa a los usuarios y por ello ha sido incluido, con carácter voluntario, en el IEE.

## INTRODUCCIÓN

El parque de viviendas en España es bastante obsoleto y muestra un nivel de conservación bajo. En relación con las condiciones acústicas cabe destacar que de los aproximadamente 18 millones de viviendas principales del parque, más del 75% de las mismas es anterior a la NBE CA 88 y en torno al 95% anterior al CTE [1](figura 1).

| Año de construcción | 1 | | ≥ 2 | | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 - 3 | ≥ 4 | 1 - 3 | ≥ 4 | |
| < 1940 | 680.683 | 3.687 | 272.852 | 489.329 | 1.446.551 |
| 1941 - 1960 | 624.646 | 1.457 | 346.055 | 889.611 | 1.861.769 |
| 1961 - 1980 | 1.156.215 | 2.388 | 781.206 | 4.483.759 | 6.423.568 |
| 1981 - 2007 | 2.236.882 | 7.774 | 1.312.285 | 3.444.532 | 7.001.473 |
| 2008 - 2011 | 233.647 | 660 | 122.404 | 438.446 | 795.157 |
| Sin datos | | | | | 425.073 |
| TOTAL | | | | | 17.953.591 |

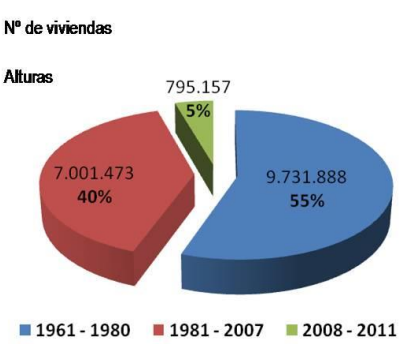



**Figura 1.** Distribución del parque edificatorio residencial en España. Viviendas principales

Las bajas prestaciones acústicas del parque son motivo de queja habitual por los usuarios, como se pone de manifiesto en múltiples estadísticas. A título de ejemplo podemos citar la encuesta del CIS de 2010, según la cual el 42% de la población no estaba satisfecho con el aislamiento acústico de sus viviendas (porcentaje superior al de los que no estaban satisfechos con el aislamiento térmico). Cifras inferiores de insatisfacción obtenemos de las encuestas del INE, aunque también en este caso los ruidos producidos por los vecinos o el exterior ocupan para los usuarios el primer lugar entre los problemas en la vivienda y su entorno [2](figura 2).

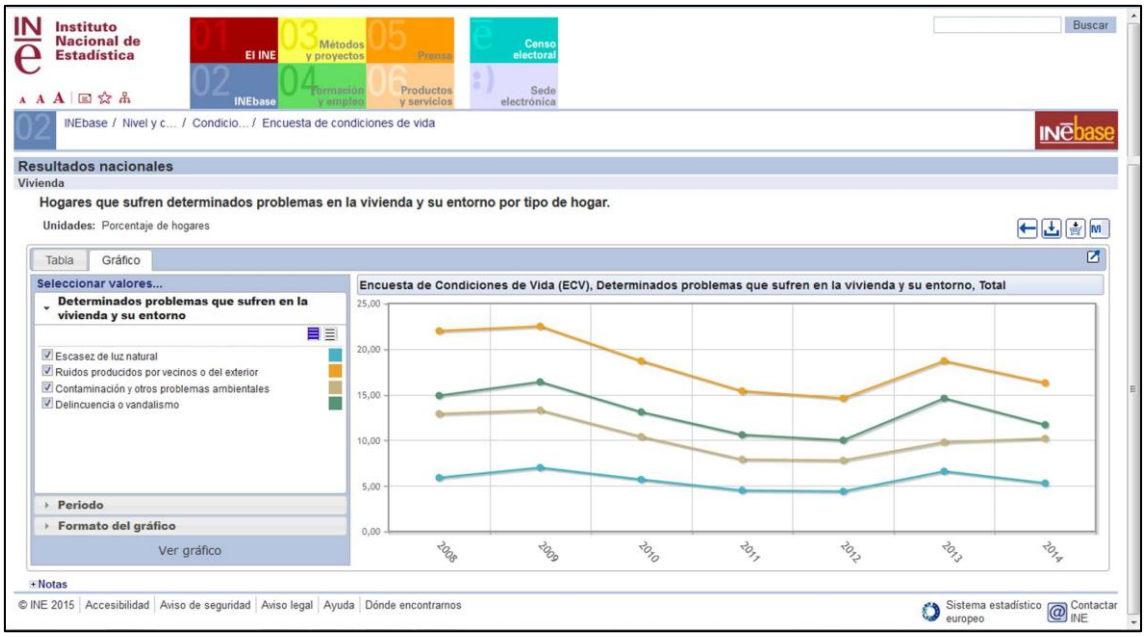



**Figura 2.** Estadísticas INE. Encuesta condiciones de vida. Evolución 2008-2014

Por el contrario rara vez las molestias por motivos acústicos son el detonante de una intervención de rehabilitación. Varios pueden ser los motivos, pero posiblemente entre los mismos cabe citar el desconocimiento por parte del usuarios de las posibilidades para remediarlo de forma efectiva y real, y el impacto económico de la implantación de las medidas.

## EL INFORME DE EVALUACIÓN DEL EDIFICIO

La ley 8/2013 crea y regula el Informe de Evaluación del Edificio [3][4]. El legislador estatal, al regular este Informe de Evaluación, va más allá de los objetivos planteados por el Informe Técnico del Edificio y trata de asegurar la calidad y sostenibilidad del parque edificado, así como obtener información que le permita orientar el ejercicio de sus propias políticas. En el Informe no solo se abordan los aspectos relacionados con la conservación del edificio, sino que se incluyen otros aspectos como la accesibilidad, la eficiencia energética del edificio y sus prestaciones acústicas. Estas última parte es de carácter voluntario y no está regulada en la Ley.

Al margen de los objetivos antes citados (recogidos explícitamente en la exposición de motivos de la Ley), el Informe de Evaluación del Edificio se concibe como un elemento fundamental en la concienciación del usuario sobre las condiciones reales del edificio en relación con materias tan sensibles para él (como queda reflejado en las estadísticas) como la accesibilidad, la eficiencia energética o el comportamiento acústico. Pero el Informe, en la misma línea que la certificación energética que en el mismo se incluye, se concibe además como un elemento de orientación al usuario sobre las posibilidades de subsanación, o al menos de mitigación, de las deficiencias que el edificio presenta en las áreas que en el mismo se contemplan.

El usuario no solo debe ser consciente de estas deficiencias (lo que en la mayoría de los casos ya conoce, como ponen de manifiesto las encuestas) sino que debe conocer el potencial de mejora en relación con las mismas, incentivándose así las obras de reforma desde una óptica realista.

También resulta fundamental que en las obras de reforma, la intervención no se limite a mejorar la causa que las , sino que fruto del análisis global del edificio por el técnico se planteen reformas integrales del mismo, buscando al máximo las sinergias que pueden

producirse. Poco importa que el detonante de una intervención sea por ejemplo un problema de conservación en una fachada, si del análisis del edificio y de la propia intervención prevista se concluye que existe la posibilidad de mejorar considerablemente sus prestaciones térmicas y acústicas con una inversión limitada, tal es el caso de las intervenciones en las que se sustituyen las ventanas, en las que pueden mejorarse a la vez las prestaciones térmicas y acústicas con poco esfuerzo. En definitiva se trata de rehabilitar sin equivocarse, parafraseando el titulo de una publicación divulgativa francesa "rénover sans se tromper" [5] donde se explican las exigencias reglamentarias térmicas en clave didáctica para el usuario.

En línea con lo indicado en el párrafo anterior, cabe decir que si bien la reglamentación juega un papel fundamental en la mejora de calidad del parque edificatorio, poco puede avanzarse si no se consigue una mayor complicidad del usuario. Como es sabido la reglamentación técnica con carácter general y el CTE en particular, no tienen carácter retroactivo, por lo que si el usuario no entiende y valora positivamente las posibilidades de mejora de su confort y su calidad de vida que pueden derivarse de una intervención, adoptarán una posición reactiva, convirtiéndose la reglamentación más en un elemento disuasorio para la rehabilitación que en elemento potenciador de la misma, al fijar límites aparentemente estrictos para el usuario, que no es capaz de valorar las mejoras derivadas de la aplicación de la reglamentación.

## EL PAPEL DEL TÉCNICO

Pero es evidente que corresponde al técnico un papel fundamental en todo este proceso. Las materias que se abordan en el informe del edificio, y en particular la acústica, son complejas y difíciles de entender y valorar por un usuario medio. La vulgarización del mensaje restaría rigor al Informe, pero una visión excesivamente técnica del mismo impedirían el cumplimiento de uno de los objetivos básicos del mismo, como es la concienciación del usuario sobre los problemas del edificio y sobre su posible subsanación o mejora. El técnico tiene que ser capaz de operar como si de un médico de cabecera se tratara, identificando el problema y las posibles soluciones, abriendo la vía a la intervención del especialista que mediante una valoración pormenorizada del edificio, podrá elaborar el proyecto de intervención correspondiente.

En cualquier caso, es importante no sacar de contexto el IEE. En el mismo solo se realiza una evaluación cualitativa de las prestaciones acústicas del edificio. Obviamente esta aproximación es muy limitada. Por ejemplo, se hace una evaluación a nivel de edificio y no a nivel de recinto, es decir, no se evalúan cada uno de los recintos de forma pormenorizada como sería necesario para poder diagnosticar correctamente el comportamiento acústico. Sin embargo, está concebido para poder detectar las principales fuentes de ruido más frecuentes en edifiios residenciales y asimilables clasificadas como ruido exterior, ruido interior y ruido procedente de las instalaciones y de los recintos de actividad. Esta evaluación cualitativa debe valer, no obstante, para que el técnico oriente al usuario y servir de detonante para una intervención acorde a las posibilidades de mejora detectadas.

Como decíamos antes, el papel y formación del técnico es vital para que este informe cualitativo sea suficientemente riguroso como para identificar el potencial de mejora y proponer las diferentes opciones posibles y su valoración inicial, tanto en términos de mejora de prestaciones como económico. El IEE se plantea, en lo referente a acústica como una especie de listado de puntos que inciden sobre el comportamiento acústico del edificio, obviándose formulas o criterios que permitan en base a los datos suministrados plantear de forma automática las propuestas de mejora. Es necesario evitar las respuestas de catalogo estereotipadas y debe ser el técnico, con cualificación suficiente, quien valore la situación y posibilidades de mejora de forma coherente con el resto de datos de que dispone relativos a estado de conservación, situación frente a la accesibilidad o eficiencia energética, planteando propuestas de conjunto contextualizadas e integradas, que además en muchos casos se verán fuertemente limitadas por los condicionantes arquitectónicos y de valor patrimonial del edificio.

Desde este punto de vista, el IEE también pretende, con el listado de cuestiones planteadas, orientar a los técnicos sobre aquellos puntos que debieran tener en cuenta para poder valorar el edificio, pero evitando las respuestas o valoraciones por defecto (que pueden observarse por ejemplo en algunos programas de calificación energética), ya que se considera fundamental que la evaluación se realice por técnicos cualificados con conocimientos en la materia.

## EL IEE, DESENCADENANTE DE LA REHABILITACIÓN

Como ya se ha dicho anteriormente, el IEE, así concebido, debe jugar un papel importante como detonante de una intervención de rehabilitación integral y coherente con las condiciones del edificio y su potencialidad de mejora en los diferentes ámbitos. Debe ser capaz de movilizar a los usuarios y provocar en ellos la decisión de intervenir en el edificio, sobre la base de que dicha intervención mejorará su confort y eliminará o disminuirá aquellas molestias que padece. La rehabilitación como repuesta a una necesidad del usuario, a la que el IEE plantea una respuesta, y no la rehabilitación como una imposición al usuario con un coste y unas molestias asociadas, para las cuales no percibe un retorno claro.

Pero debe insistirse en la necesidad de no sacar de contexto el IEE. Su existencia supone un buen punto de partida ya que habrá permitido el planteamiento, por el ténico, de opciones de mejora integrales, sobre la base de una diagnosis inicial, donde se haya valorado las posibles sinergías y evitado los efectos negativos que determinadas soluciones pueden producir sobre otras prestaciones (debe recordarse el criterio de no empeoramiento incluido en la parte I del CTE). Pero debe ser entendido como el punto de partida para una intervención que requerirá de una diagnosis completa, especialmente importante en el ámbito de la acústica, donde el analisis de las patologias más frecuentes, la realización de ensayos in situ, y un análisis sistemático de los distintos puntos críticos, permita plantear una solución de intervención viable y fiable (figura 3). El IEE no puede ni debe sustituir a un buen proyecto basado en una diagnosis exhaustiva y completa de la situación.

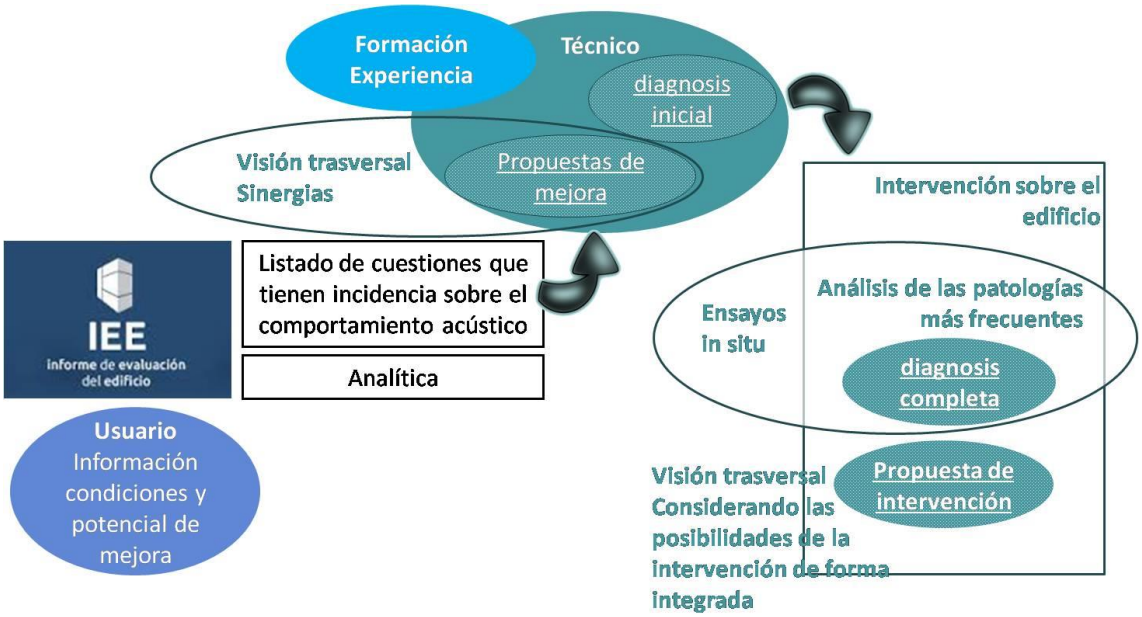



**Figura 3.** Esquema desarrollo propuesta de intervención

## CONCLUSIONES

El parque edificatorio español presenta un comportamiento acústico muy deficiente, lo que es percibido por los usuarios que manifiestan sus quejas al respecto en los estudios sociológicos que sobre condiciones de vida se realizan.

A pesar de ello, rara vez la rehabilitación de un edificio responde al interés de mejorar las condiciones acústicas del mismo, lo que pone de manifiesto un desacople entre la percepción del usuario sobre las condiciones acústicas de su vivienda y la necesidad de mejorarlas.

El usuario en la mayoría de los casos no conoce las posibles medidas de mejora de las condiciones acústicas de su vivienda y es incapaz de valorar el efecto positivo que su implantación pudiera tener sobre su confort en el uso y disfrute de la misma.

El Informe de Evaluación del Edificio, que incluye un anexo de carácter voluntario de valoración de las condiciones acústicas del edificio, puede jugar un papel relevante como elemento desencadenante de la rehabilitación al aportar al usuario propuestas de mejora de las condiciones acústicas integradas y coherentes con el resto de necesidades del edificio, posibilitando las sinergias en la intervención.

Es especialmente relevante el papel del técnico para trasmitir de forma certera, real y fiable las posibles vías de actuación, el impacto económico de su implantación y la mejora de confort para el usuario. Para ello se requiere la intervención de técnicos suficientemente formados en la materia y capaces de integrar las soluciones acústicas en el conjunto del edificio.

El IEE no puede, ni debe sustituir el proyecto de intervención. Supone una base sólida para el desarrollo del mismo, pero debe ser completado con una diagnosis completa, ya que el IEE solo es una evaluación cualitativa inicial del conjunto.

## BIBLIOGRAFIA

[1] *Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el sector de la edificación en España. (http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/PLANES/ELPRESEEESP/)*
[2] *Instituto Nacional de Estadística. Encuesta de condiciones de vida (http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176807&menu=resultados&idp=1254735976608)*
[3] *Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. BOE 27 de junio de 2013. (https://www.boe.es/boe/dias/2013/06/27/pdfs/BOE-A-2013-6938.pdf)*
[4] *El Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria y la regeneración y renovación urbanas, 2013-2016. BOE 10 de abril de 2013.* (*https://www.boe.es/boe/dias/2013/04/10/pdfs/BOE-A-2013-3780.pdf)*
*[5] Une nouvelle réglementation pour économiser l'énergie: rénover sans se tromper. ADEME. Abril 2008. (http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT_existant/par_element/Renover_sans_se_tromper.pdf)*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CONDICIONES ACÚSTICAS EN BARES-RESTAURANTES: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN AL ESTABLECIMIENTO DE LA "DISTANCIA MÍNIMA DE CONFORT" ENTRE MESAS

PACS: 43.55.Hy

Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, Marisol; Calzado Estepa, Eva
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante - Edif.: Politécnica II
Universidad de Alicante - Campus de San Vicente del Raspeig
Email: jenaro@ua.es; myebra@ua.es; evace@ua.es;

**ABSTRACT**
In this work we have studied 19 Bars-Restaurants facilities. In them, through measures "in situ", we have calculated the level of verbal interference LSIL - SIL. In order to analyze the noise situation from the point of view comfort: geometric data, reverberation and noise levels, in empty and in use room, are collected. It is also studied the arrangement of tables and chairs to discuss its relevance to the minimum recommendations on ergonomics and food runners and waiters movements.
Finally it is determined, from acoustic conditions on privacy, which is the minimum distance between tables comfort. It finds that the distance is (1.5 meters), for the most sensitive possible situation, is higher than recommended by the standards of good practice in the world of hospitality.

KEYWORDS: Noise in hospitality, Speech interference level, Restaurant ergonomics, Acoustic privacy.

**RESUMEN**
En este trabajo se han estudiado 19 establecimientos Bares - Restaurantes, en los que se ha determinado el nivel de interferencia verbal $L_{SIL}$ - SIL mediante medidas “in situ”. Con el fin de analizar su situación acústica desde el punto de vista confort se recogen datos geométricos, de reverberación y de niveles de ruido en vacio y en uso. Tambien se estudia la disposición de mesas y sillas para la discusión de su adecuación a las recomendaciones mínimas sobre circulación de servicio y ergonomía de movimientos.
Por último se determina a partir de condicionentes acústicos sobre privacidad cuál es la distancia mínima de confort entre mesas. Se comprueba que dicha distancia (1.5 metros) para la situación más sensible posible es superior a la recomendada por los estandares de buenas prácticas en el mundo de la hostelería.

PALABRAS CLAVE: Ruido en hostelería, Nivel de interferencia verbal, Ergonomía en Restaurantes, Privacidad acústica

## INTRODUCCIÓN

Los bares, restaurantes y por extensión cualquier local que dispone de mesas para el servicio de comidas o bebidas (no dedicado al ocio musical) se pueden considerar como espacios de relación verbal en el mismo rango de importancia

que lo son para el consumo de viandas y refrigerios. En muchos casos se les puede considerar como un sustituto del propio hogar y en menor medida una extensión del lugar de trabajo o estudio. Es por lo que pensamos que deberían ofrecer a los usuarios un exquisito ambiente acústico donde poder dialogar con comodidad entre los componentes de la mesa, y sin interferencias ajenas. Ya sea de conversaciones cercanas, ruidos de maquinaria, vajilla, cubertería, cocina, música ambiental, televisión, etc. Al conjunto de estos elementos se les puede calificar como ruido molesto (sin carga inteligible), pero la televisión y las conversaciones de alrededor muchas de las veces producen injerencia negativa puesto que su carga es principalmente hablada, y por tanto es más incisiva para la falta de confort. Aparte, los discursos de las mesas cercanas o el nuestro respecto a los otros, pueden llegar a ser inteligibles con lo que se produce una pérdida muy grave de privacidad. Esta cuestión nos parece de gran calado pues tal como hemos apuntado; los lugares de restauración son públicos pero con un sentido, por parte del usuario, de que tu mesa te pertenece, es un espacio propio.
Se realizará una prospección sobre el terreno de las características acústicas de una serie de bares-restaurantes y analizaremos, tanto si sus valores de ruido afectan a la inteligibilidad de la palabra en la zona de comedor, como si es posible que se pueda mantener una conversación y que ésta se pueda considerar privada. Para la primera parte haremos uso de lo que dicta la normativa al respecto calculando el Nivel de Interferencia Verbal - SIL/LSIL- (Speech Interference Level) [2] [7]. Para la segunda parte usaremos una aproximación con ayuda de las expresiones de propagación del campo sonoro en un recinto y una herramienta de calculo especializada [14], también ha sido necesario la revisión de la distribución de las mesas y zonificación de los espacios desde el punto de vista de ergonomía del personal de servicio como de confort de los usuarios y normativa de accesibilidad [3] [4] [5] [6] [8] [10] [11] [12] [13].

## MATERIAL Y MÉTODO

Para llevarlo a cabo se han analizado diecinueve restaurantes, de los cuales tres se encuentran en el campus de la Universidad de Alicante, quince se encuentran en el municipio de Sant Antoni de Portmany de la isla de Ibiza y uno en el centro de la ciudad de Ibiza. Los instrumentos utilizados han sido:

- Smartphone Samsung Galaxy S2 con la aplicación móvil Grabadora Easy Voice Recorder Pro, con el que se han realizado las grabaciones.
- Sonómetro RION NL-05, con el que se han medido el nivel de presión sonora equivalente. Global, en ponderación lineal.
- Globos de caucho utilizados para obtener una señal impulsiva en la medida del tiempo de reverberación.

En cada local se ha realizado el mismo procedimiento, consistente en realizar una toma de datos sobre las características arquitectónicas: cotas, geometría y tamaño de los elementos que componen la sala. Materiales utilizados en el

revestimiento de los cerramientos de ésta. Además de una serie medidas acústicas para el posterior análisis.

Las pruebas acústicas realizadas en los locales han consistido en:

- *Ruido de fondo en vacío*: se ha realizado una medida de presión sonora y una grabación durante un periodo entre 1 y 5 minutos.
- *Respuesta impulsiva*: con el local vacío y en silencio, se han realizado 3 grabaciones de la explosión de 3 globos.
- *Ruido de fondo durante el servicio de comida*: del local se ha realizado una medida de presión sonora y una grabación durante un periodo de tiempo de entre 1 y 5 minutos; estas pruebas se han llevado a cabo simulando la posición del oyente, es decir, los dispositivos se han situado en una mesa céntrica del local a una altura aproximada respecto al suelo de 1,20 m, simulando la posición de una cabeza humana cuando la persona se encuentra sentada. Además se contabilizan las mesas ocupadas y el número de comensales en el momento de la medición.
- *Ruido exterior en la acera de la fachada del local*: se ha realizado una medida de presión sonora y una grabación durante un periodo de tiempo de aproximadamente 10 minutos.

Tras la toma de datos se procesan las grabaciones, con lo que obtenemos:

- *Tiempo de reverberación*: mediante el software dBBATI32 se ha obtenido el resultado del tiempo de reverberación experimental en cada uno de los restaurantes. Posteriormente mediante la Herramienta oficial de cálculo del DB-HR del CTE se ha calculado por el método general el tiempo de reverberación teórico de la sala con lo que se ha ajustado la absorción de los materiales y objetos.
- *'Noise Criteria'*: determinando el valor NC a partir del espectro obtenido de las grabaciones y del valor del Leq obtenido por el sonómetro para el caso de recinto vacío.
- *LSIL*: a partir de las medidas con restaurante en servicio.

Con todo ello lo que hemos pretendido, principalmente, ha sido:

a) Determinar el confort y la inteligibilidad conversacional en las mesas.

b) Verificar el cumplimiento de las exigencias de la normativa de accesibilidad y aplicación de las pautas de distribución interior de locales de restauración.

c) Analizar cuál sería el índice de privacidad, en función de los datos que disponemos, planteando la hipótesis más desfavorable (sólo dos mesas contiguas ocupadas).

Una vez que se dispone de esa información, se han construido una serie de fichas individualizadas para cada restaurante [16]. Donde se ha añadido la posible solución si hubiera que encontrarla. Nos hemos apoyado, para valorar las propuestas, en una hoja de cálculo programada para el cálculo del LSIL [14]; donde se trabaja con el volumen de la sala, número de mesas y comensales, nivel de potencia de la voz y el tiempo de reverberación de la sala en bandas de octava de 500 Hz a 4000 Hz.

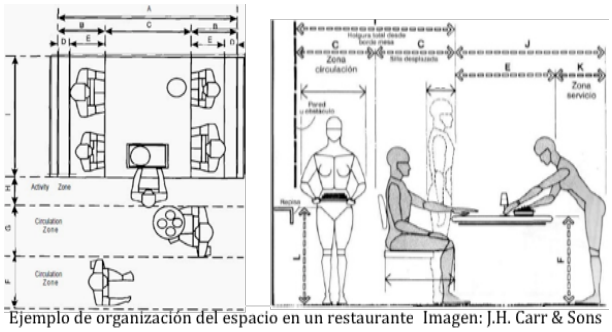
## PREMISAS

Antes de mostrar los resultados obtenidos debemos aclarar cuáles han sido los parámetros de referencia, en los que nos basamos, para juzgar y proponer las actuaciones y reformas necesarias.

***A.*** Respecto a la distribución y condicionantes ergonómicos, hemos creído necesario estudiar las distancias entre respaldos de sillas para mesas vecinas, así como la distancia entre las mesas en si, con el fin de analizar esas distancias desde el confort de movimientos a la hora de sentarse y por supuesto también del acceso del público y del servicio.

Una guía sencilla sería el procurar que entre respaldos cuando las sillas están ocupadas quede un espacio de al menos [11] [12] :

- 76 - 92 cm: si es un espacio de servicio (que se tiene que aumentar en función de la capacidad del local, pudiendo llegar hasta los 180 centímetros en ciertas zonas donde coincida el paso usual de dos individuos).



Ejemplo de organización del espacio en un restaurante Imagen: J.H. Carr & Sons

- 31 - 45 cm: cuando no sea necesaria circulación de servicio pero permitiendo paso y el desplazamiento cómodo de las sillas de los comensales.
- 30 - 31 cm: sin circulación ni paso pero si desplazamientos al acomodarse.
- 35 a 46 cm: entre el respaldo de la silla y la pared u obstáculo.
- La zona de circulación para minusválidos entre pared y mesa o pasillo de acceso será: 1.37m de ancho.

***B.*** Respecto a la cuestión de la inteligibilidad entre comensales, se va a considerar suficiente el valor mínimo de Interferencia verbal (SIL ≥ 10 dB), lo que corresponde a una distancia aproximada de 40 - 80 cm para mantener una conversación, no estresante, con una voz entre normal y elevada [15]

| DISTANCIA (m) | ORADOR*FUENTE | V (m3) | f (oct) Hz | TR (s) |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 0 | 290 | 500 Hz | 0,8 |
| 8 | 1 | | 1000 Hz | 0,8 |
| 9 | 1 | | 2000 Hz | 0,7 |
| 10 | 0 | | 4000 Hz | 0,6 |
| 5 | 0 | | | |
| 5 | 1 | SELECCIONA ES. VOCAL | NORMAL | |
| 6 | 0 | Lw_500 (dB) | 70,2 | |
| 7 | 1 | Lw_1000 (dB) | 64,2 | |
| 8 | 0 | Lw_2000 (dB) | 58,2 | |
| 2 | 0 | Lw_4000 (dB) | 52,2 | |
| 1 | 1 | | | |
| 3 | 0 | | | |
| 4 | 0 | Nº REFLECTORES | 1,5 | |

| Inteligibilidad | Indice RASTI |
|---|---|
| Muy Pobre | 0 a 0.3 |
| Pobre | 0.3 a 0.45 |
| Aceptable | 0.45 a 0.60 |
| Buena | 0.60 a 0.75 |
| Excelente | 0.75 a 1 |

| COMPRENSIÓN | INTELIGIBILIDAD | IAIS | SIL (dB) |
|---|---|---|---|
| > 96% | Excelente | 0.95 | 21 |
| 85% | Buena | 0.75 | 15 a 21 |
| 75% | Satisfactoria | 0.65 | 10 a 15 |
| < 65% | Escasa | < 0.57 | 3 a 10 |

RESULTADOS

| | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | $L_{pband}$ (dB) |
|---|---|---|---|---|---|
| Lp_DIRECTO (dB) | 63,6 | 57,6 | 51,6 | 45,6 | 64,9 |
| Lp_REVERBERANTE (dB) | 65,5 | 59,5 | 52,9 | 46,3 | 66,7 |
| Lp_TOTAL (dB) | 67,7 | 61,7 | 55,4 | 49,0 | 68,9 |

| $INTELIGIBILIDAD_{RASTI}$ | DISTANCIA CRÍTICA | DISTANCIA ENTRE INTERLOCUTORES (m) | |
|---|---|---|---|
| | | PARA ESFUERZO VOCAL SELECCIONADO | PARA ESFUERZO VOCAL SUPERIOR AL SELECCIONADO |
| 0,65 | 1,1 | | |
| | RELAJADO | --- | --- |
| $L_{SIL}$ (dB) | NORMAL | 0,1<--------->0,3<--------->0,4<--------->0,5 | --- |
| | ELEVADA | --- | 0,3<--------->0,6<--------->0,9<--------->1 |
| 58,4 | ALTA | --- | 0,6<--------->1,2<--------->1,8<--------->2,2 |
| | MUY ALTA | --- | 1,2<--------->2,6<--------->3,6<--------->4,6 |

| Nº DE MESAS | 13 |
|---|---|
| Nº DE ORADORES | 5 |

SIL 21 (dB) | SIL 15 (dB) | SIL 12 (dB) | SIL 10 (dB) | SIL 21 (dB) | SIL 15 (dB) | SIL 12 (dB) | SIL 10 (dB)

***C.*** Para la definición de la distancia mínima de privacidad se han conjugado las dos cuestiones anteriores partiendo de la situación más desfavorable. O sea que en el recinto, solamente estén ocupadas dos mesas contiguas y que una de ellas estuviera en silencio. La idea es que el respaldo de la silla más cercana a la mesa donde se mantiene una conversación, deberá estar a una distancia tal que el discurso no sea inteligible. Otro de los supuestos iniciales será, que el ruido de fondo sea el normal (camareros y equipamiento activos) pero sin música ambiental ni aparatos de televisión funcionando.

Se mostrará la disposición original de uno de los restaurantes estudiados junto con la disposición final propuesta, es con esto con lo que se ha jugado, comprobando si se cumplían los preceptos de ergonomía, y si la distancia de privacidad estaba dentro de la zonificación antes y después de la propuesta de mejora; ya sea aconsejada por el SIL obtenido, o por carencias en la distribución de mesas y sillas.

Podemos adelantar que si la distribución de las mesas cumple con los consejos sobre ergonomía también cumple las condiciones de privacidad para un nivel de voz 'normal', cuando los recintos tienen todas sus mesas ocupadas, por lo que a esa distancia la podemos considerar suficiente sólo en ese caso particular, que es el que aparece en las fichas. La distancia de confort que

propugnamos en el título la abordaremos al final de la ponencia

**RESULTADOS**

A continuación se presenta la ficha del restaurante AMPLE-32 como ejemplo de lo que hemos elaborado para cada uno de los locales estudiados.

**5.1. AMPLE 32**

**Datos del restaurante**

El restaurante Ample 32 es un restaurante de cocina moderna, situado en la planta baja del hotel Blau Parc en la C/ Soledad nº 64 del pueblo de Sant Antoni de Portmany (Ibiza).
Durante la toma de medidas se ha observado que durante el servicio, el local dispone de música.

**Distribución interior**

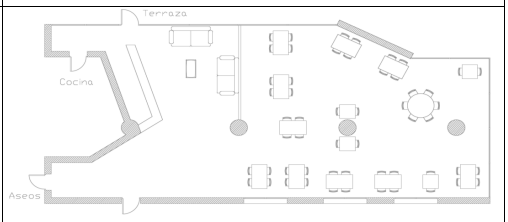



*Fig. 26. Plano en planta del restaurante Ample 32. Fuente: Elaboración propia.*

**Fotografías**



*Fig. 27. Imágenes del interior del restaurante Ample 32. Fuente: Cedidas por el restaurante Ample 32.*

| | | |
|---|---|---|
| **Materiales** | Techo | - Placa de yeso laminado.<br>- Placa de fibra. |
| | Suelo | - Baldosa de mármol. |
| | Paredes | - Enlucido de yeso.<br>- Aplacado cerámico. |
| | Ventanas | - Grandes paños formados por vidrio con marco de aluminio. |
| | Puertas | - Vidrio con marco de aluminio.<br>- Metálica. |
| | Mobiliario | - Sillas de plástico.<br>- Mesas de madera. |
| | Otros | - Mantelería y cortinas de tela. |
| **Datos obtenidos** | Volumen | 448.35 $m^3$ |
| | Altura | 3.00 m |
| | Ruido de fondo en vacío | 67 dBA, debido a ruidos procedentes de maquinaria situada en la barra del restaurante. |
| | Tiempo de reverberación | Hz: 500 / 1K / 2K / 4K / $TR_{med}$<br>s: 1.0 / 0.9 / 0.9 / 0.8 / 0.9 |
| | Ruido exterior | 74 dBA. |
| | Ruido de fondo en el interior | 72 dBA, con 7 personas sentadas y música de fondo. |

| **LSIL** | Hz | 500 | 1K | 2K | 4K | LSIL | Dist. (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dB | 65.2 | 61.7 | 60.0 | 61.5 | 62 | 0.3 |

**Análisis y soluciones**

Analizando los datos obtenidos, comprobamos que el tiempo de reverberación de la sala es de 0.9s, por lo tanto cumple con las exigencias del CTE.
En cuanto a accesibilidad y distribución interior, encontramos que el restaurante no se adapta a las medidas de la norma para una correcta circulación interior. Por este hecho se ha propuesto una nueva redistribución interior adaptando los parámetros establecidos por la normativa de accesibilidad y las recomendaciones de distribución interior en locales de restauración.

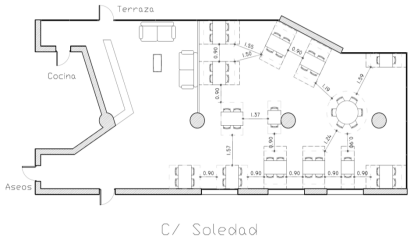



*Fig. 28. Plano en planta de la redistribución interior del restaurante Ample 32. Fuente: Elaboración propia.*

El $L_{SIL}$ obtenido en este restaurante es de 62dB, por lo que la distancia máxima a la que se considera que la comunicación es satisfactoriamente inteligible es de 0.3m. Esta distancia no sería la más adecuada, ya que consideramos como una distancia aceptable 40cm.
Para solucionar este caso, realizamos una simulación adaptándonos a la nueva distribución interior del local en la que el número de mesas se ve reducido de 15 a 14 y éstas se encuentran más distanciadas por el hecho de cumplir con la normativa de accesibilidad. Además se simula reduciendo el ruido generado por la música de fondo, buscando obtener una distancia satisfactoria para la comunicación verbal, pero a la vez generando un ruido que aporte privacidad a los miembros de una misma mesa. El $L_{SIL}$ obtenido en la simulación es de 61dB, por lo que la distancia a la que se puede tener una conversación con un esfuerzo vocal normal será de aproximadamente 40cm.

*Tabla 6. Ficha del restaurante Ample 32. Fuente: Elaboración propia.*

Veamos ahora una tabla resumen de los resultados más significativos obtenidos:

| RESTAURANTE | V(m³) | H(m) | $L_{fondo}$vacio (dBA) | MESAS(nº) | $L_{exterior}$(dBA) | MAQUINARIA(S/N) | $Tr_{mid}$(s) | MÚS-TV (S/N) | RUiDO SERV.(S/N) | Mesas ocupadas(nº) | PERSONAS(nº) | $L_{fondo}$OCUPADO (dBA) | $L_{SIL}$(dB) | D. Conversa.(m) | ERGO (S/N) | MÚSICA-0K (S/N) | MESAS-0K(nº) | $Tr_{mid}$(s)-0k | $L_{SIL}$(dB)-0K | D. Conv.(m)-0K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AMPLE32 | 448 | 3.0 | 67 | 15 | 74 | N | 0.9 | S | N | 3 | 7 | 72 | 62 | 0.3 | N | N | 14 | 0.9 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| CANGUILLAMO | 284 | 2.8 | 65 | 18 | 73 | S | 0.7 | S | S | 4 | 10 | 76 | 66 | 0.2 | N | N | 13 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| CHAMONIX | 225 | 2.8 | 66 | 14 | 71 | S | 0.7 | S | S | 10 | 19 | 78 | 68 | 0.2 | N | N | 12 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| COMMA | 170 | 2.9 | 69 | 12 | 76 | S | 0.7 | S | N | 8 | 20 | 80 | 70 | 0.1 | N | N | 9 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| M. DEL OLIVO | 207 | 2.8 | 68 | 16 | 78 | S | 0.6 | N | S | 6 | 15 | 75 | 66 | 0.2 | N | N | 13 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| EL TOSSAL | 223 | 2.8 | 62 | 15 | 73 | S | 1.4 | S | S | 8 | 20 | 78 | 70 | 0.1 | N | N | 9 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| ES NAUTIC | 141 | 2.8 | 67 | 9 | 67 | S | 0.5 | S | S | 9 | 12 | 73 | 64 | 0.3 | N | N | 6 | 0.5 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| ES VENTALL | 262 | 3.0 | 61 | 9 | 74 | S | 0.7 | S | S | 6 | 19 | 80 | 71 | 0.1 | N | N | 7 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| GRAN CHINA | 305 | 3.0 | 69 | 19 | 74 | N | 0.8 | S | S | 6 | 14 | 73 | 65 | 0.2 | N | N | 13 | 0.8 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| SANT ANTONI | 304 | 3.0 | 59 | 16 | 63 | S | 0.9 | S | S | 5 | 14 | 75 | 66 | 0.2 | N | N | 14 | 0.9 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| KANTAUN | 149 | 3.0 | 64 | 6 | 68 | S | 0.9 | S | S | 4 | 13 | 77 | 69 | 0.2 | N | N | 4 | 0.9 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| C. PORTMANY | 272 | 3.0 | 69 | 9 | 67 | S | 0.7 | S | S | 9 | 17 | 76 | 67 | 0.1 | N | N | 6 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| MAR I TERRA | 449 | 3.0 | 55 | 21 | 70 | S | 1.1 | N | N | 4 | 7 | 67 | 57 | 0.5 | N | N | 15 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| RIAS BAIXAS | 423 | 3.2 | 60 | 15 | 68 | S | 0.6 | S | S | 7 | 11 | 74 | 63 | 0.3 | N | N | 13 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| RITA'S CANTINA | 227 | 4.5 | 57 | 11 | 67 | S | 0.9 | S | S | 5 | 14 | 75 | 67 | 0.2 | N | N | 6 | 0.9 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| S'OLIVERA | 434 | 3 | 64 | 13 | 73 | S | 1.1 | SS | S | 4 | 10 | 82 | 74 | < 0.1 | N | N | 13 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| TIJUANA TEXMEX | 619 | 6.0 | 67 | 28 | 71 | S | 0.6 | S | S | 12 | 29 | 79 | 71 | 0.1 | N | N | 17 | 0.6 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| VILLA MANCHEGA | 261 | 2.9 | 67 | 6 | 71 | S | 0.7 | S | S | 6 | 20 | 77 | 69 | 0.2 | N | S | 4 | 0.7 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |
| ZEBRA | 217 | 2.8 | 68 | 13 | 71 | S | 0.9 | SS | S | 6 | 14 | 76 | 68 | 0.2 | N | N | 8 | 0.9 | 60 - 61 | 0.4 - 0.5 |

Una de las cosas que más llama la atención es que, en todos los casos el nivel de ruido de fondo en vacío -$L_{fondo}$vacío- es muy elevado, en cuatro ocasiones igual a 68 dB(A) o superior. Lo que nos indica que esos recintos, ya sin ocupación, tendrían un valor de interferencia verbal -$L_{SIL}$- en el límite de lo deseado. Lo ideal es que el nivel de fondo en vacío rondara los 60 decibelios para evitar estas situaciones. Y además cuando se mide el ruido de fondo con ocupación, -$L_{fondo}$OCUPADO- (de donde se deduce el $L_{SIL}$), como la diferencia que existe entre ambas medidas de ruido de fondo, es menor o igual a 10 decibelios (ocurre en siete de los ejemplos); es evidente que el resultado obtenido para el ruido de fondo con ocupación, está muy influenciado por el ruido de fondo en vacío.

Es por lo que la falta de confort constatada, no se debe tanto al ruido generado por las conversaciones sino que es responsabilidad del mismo restaurante. Si además, tenemos en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Existencia de "barra", sin ninguna separación ni física ni espacial, en el propio recinto del comedor.
- ✓ Casi constante presencia de música de fondo y/o el sonsonete de las televisiones encendidas.
- ✓ Ruido del servicio al trajinar con la vajilla y cubertería.
- ✓ Cocinas conectadas directamente con la sala sin buffer de acceso.

Se puede aventurar que es difícil juzgar la situación, que tal como la vemos es un desastre. Solamente uno de los restaurantes (Mar i Terra) cumple con el nivel de confort de palabra requerido (la ocupación era muy baja cuando se realizó la medida).

Hay que remarcar además que para el resto de locales, las medidas efectuadas arrojan unos resultados desesperanzadores, y que las condiciones no fueron las más desfavorables, puesto que no estaban ocupados al completo (en 15 de los 19 restaurantes la ocupación era menos del 50% de su capacidad).

Con la actuación sobre todos estos condicionantes y aplicando las buenas prácticas organizativas respecto a la ergonomía y acceso, se plantea una situación donde se podría llegar a mantener una conversación, con voz normal, en el límite de la inteligibilidad (SIL entre 10 dB y15 dB) lo que quiere decir que nuestro nivel de voz estará aproximadamente entre 5 y 9 decibelios por encima del ruido. Las soluciones aportadas cumplen las siguientes condiciones necesarias:

No música de ambiente. No televisiones ni otros dispositivos electro-acústicos. Reducir al mínimo el ruido de servicio, platos, cubiertos, cocina, maquinaria, cafetera, congeladores, acondicionadores, etcétera. Paliar la inmisión de ruido de estancias colindantes ajenas al comedor. Si se cumplieran estas premisas, las soluciones aportadas podrían funcionar.

Respecto a la distancia de confort que propugnábamos en el título de la comunicación. Lo ideal sería tener un ruido de fondo en vacío de unos 60 dBA. Veamos que pasa en los siguientes casos:

a) Todas las mesas están ocupadas —› Ruido de fondo ≈ 68 dBA —› —› Nivel de interferencia verbal: LSIL = 68 - 8 = 60 dB —› —› Máxima distancia inteligible ≈ 0.4 a 0.6 metros.

Como la distancia entre mesas se ha supuesto que cumple los mínimos de ergonomía (0.9 m), resulta que si que existe privacidad entre mesas contiguas.

Pero nuestra intención principal es, determinar una distancia de confort entre mesas relacionada con la privacidad en el caso más sensible; que solamente estén ocupadas dos mesas y que sean contiguas. Aparte, una habla y la otra está en silencio escuchando. Entonces tenemos que replantear el problema. Veamos como:

b) Dos mesas están ocupadas —› Ruido de fondo ≈ 60 dBA —› —› Nivel de interferencia verbal: LSIL = 60 - 8 = 52 dB —› —› Máxima distancia inteligible ≈ 1.3 a 1.5 metros.

Esto nos lleva a decir que en esas circunstancias la distancia entre respaldos debería ser de 1.5 metros para que existiera privacidad.

Con este razonamiento simple acabamos de establecer lo que llamaremos **"DISTANCIA MÍNIMA DE CONFORT" ENTRE MESAS,** que no hay que olvidar que es totalmente dependiente del ruido de fondo en la sala en funcionamiento.

Se podrían reducir las exigencias (ruidos de fondo más elevados) y así no tener que separar tanto las mesas, pero creo que si se quiere tener un parámetro con suficiente margen de credibilidad ante cualquier eventualidad es acertado consignar la distancia de 1.5 metros como la distancia mínima de confort o distancia de privacidad.

Es verdad que, el ruido de fondo variará con la presencia de mayor número mesas ocupadas y más comensales. También con la adición de música por ejemplo u otros ruidos enmascarantes, o con los ruidos del equipamiento y servicios. Eso obliga a conocer los niveles añadidos por esas circunstancias y recalcular la distancia de confort para cada caso. Sobre esta cuestión que no se ha incidido pensamos que sería interesante abordarla en otro momento.

## CONCLUSIONES

Los restaurantes, si tomamos este trabajo como representativo del comportamiento y diseño promedio, se puede asegurar que:

- No cumplen con las recomendaciones de circulación y ergonomía básicas que se relatan en los documentos de esas disciplinas.

- El valor del tiempo de reverberación se cumple en casi todos los locales de forma natural, salvo sorprendentemente en algunos comedores de los recintos universitarios estudiados.

- Por regla general el ambiente esta inundado de ruido de platos y demás. Sería conveniente el disponer de zonas de servicio, parcialmente al menos, protegidas o alejadas de la zona de comedor.

- La disposición de las barras, por regla general, es errónea y pasan a formar parte de la zona de mesas sin solución de continuidad.

- El uso de música ambiental y la existencia de televisores raya el absurdo. Pues si la música podría entenderse como ruido enmascarante que ayuda a la privacidad, en todos los casos estudiados no está justificado su uso tal y como como hemos visto.

- La presencia de aparatos de TV es desatinada como ya hemos expresado, pues ni es posible entender con claridad lo que se emite y es del todo innecesario en un espacio público con tantas mesas individualizadas, que pensamos, que son espacios íntimos a proteger. El atraer la atención, desde el punto de vista acústico, está por distintas causas en contradicción con la idea de espacios de relación (el acto de tener participar en una comida o cena, no es un momento banal como cuando nos hemos reunido en un bar para ver el futbol, por ejemplo, que es más un hecho comunitario, festivo y/o de esparcimiento).

- A pesar de que en los casos estudiados, se pueda decir que nuestras conversaciones sólo son inteligibles en la propia mesa o que tenemos suficiente privacidad. El hecho es que, como para las simulaciones hemos supuesto que estaban completos en su aforo, eso produce ruido de fondo elevado y la privacidad entre mesas está asegurada (apenas nos entendemos entre nosotros). Es por lo que con la distancia entre mesas que se proponen en las fichas, tras el estudio, a los restaurantes estudiados se les ha dado el visto bueno.

- Se ha determinado que la **"DISTANCIA MÍNIMA DE CONFORT" ENTRE MESAS** está en los 1.5 metros. De esta forma la privacidad está asegurada. Pero siempre que el restaurante cumpla las condición acústica de ruido de fondo, propuesto de 60 dBA.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. AENOR. ***UNE-EN ISO 9921:2004***. *Ergonomía. Evaluación de la comunicación verbal.*

[2]. *Álvarez Bayona, T.* ***ASPECTOS ERGONÓMICOS DEL RUIDO***. *Evaluación.* Ed.: INSHT.

[3]. CONSEJERÍA DE SANIDAD Y BIENESTAR SOCIAL - Junta de Castilla y León. ***DECRETO 217/2001***, *de 30 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento de Accesibilidad y Supresión de Barreras.*

[4]. CONSEJERIA DE VIVIENDA Y OBRAS PUBLICAS - C. A. Islas Baleares. ***DECRETO 110/2010***, *de 15 de octubre. Reglamento para la mejora de la accesibilidad y la supresión de barreras arquitectónicas.*

[5]. Fonseca, X. ***LAS MEDIDAS DE UNA CASA***. *Antropometría de la Vivienda.* Ed.: Pax México 1994. (Ver páginas: 25(comedor))

[6]. Hostelarium-Web. ***COMO ORGANIZAR EL COMEDOR DE UN RESTAURANTE*** (http://www.hostelarium.es/como-organizar-el-comedor-de-un-restaurante)

[7]. INSHT (2008). ***NTP 794***. *Evaluación de la comunicación verbal: método SIL*.

[8]. Lawson, F. ***RESTAURANTS, CLUBS & BARS***. *Planing, Design and Investiment for Food Service Facilities.* Architectural Press , Oxford 1998. (Ver páginas: 129(acústica), 105(alturas techo), 78(circulaciones), 80(requerimientos mesas y servicios) )

[9]. MINISTERIO DE FOMENTO - Gobierno de España. **CTE**. *Guía de aplicación del DB-HR..*

[10]. Neufert, E. ***EL ARTE DE PROYECTAR EN ARQUITECTURA***. Ed.: Gustavo Gili. Barcelona 1995. (Ver páginas: 216-217 (mesas y sillas))

[11]. Martínez Lazcano, J. **DIRECCION DE ALIMENTOS Y BEBIDAS EN HOTELES**. Editorial Limusa, 2005

[12]. Morfin Herrera, M. ***ADMINISTRACIÓN DE COMEDOR Y BAR***. Ed.: Trillas México 2006

[13]. Panero, J.; Zelnik, M. ***LAS DIMENSIONES HUMANS EN LOS ESPACIOS INTERIORES.*** *Estándares Antropométricos.* Ed.: Gustavo Gili. Barcelona 1996. (Ver páginas: 139 (comedor))

[14]. Robson, S.K.A.; Kimes, S.E. ***DON'T SIT CLOSE TO ME***. *Restaurant Table Characteristics and Guest Satisfaction.* Cornell Hospitality Report, Volume 9, No. 2 (January 2009)

[15]. Yebra, M., Bleda, S., Vera, J., Francés, J., Brocal, F. ***EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN VERBAL***: *Inteligibilidad, Herramientas De Cálculo*. Tecniacústica 2008, Coimbra, Portugal.

[16]. Trabajo Fin de Grado en Arquitectura Técnica - EPSA - Universidad de Alicante (en revisión) ***EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ACÚSTICA EN EL INTERIOR DE LOCALES DE RESTAURACIÓN.*** Albert Marí Ribas

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ISOLAMENTO ACÚSTICO E RESISTÊNCIA AO FOGO DE ALVENARIA COM ARGAMASSA POLIMÉRICA

PACS: 43.55.Rg

Fernanda Pacheco[1]; Roberto Christ[2]; Maria Fernanda de O. Nunes[3]

Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt PERFORMANCE
UNISINOS, Av. Unisinos, 950, CEP 93022-000 – São Leopoldo – RS – Brasil.
E-mail: [1] fernandapache@unisinos.br; [2] rchrist@unisinos.br; [3] mariaon@unisinos.br

**Resumo**

A busca pelo desempenho multicritérios fomenta atualmente a realização de pesquisas que abranjam a análise e o desenvolvimento de sistemas construtivos convencionais e inovadores nas edificações modernas. Assim, a dificuldade para os setores envolvidos é a concomitância na obtenção do desempenho em critérios com diferentes variáveis de relevância. Diante do exposto o objetivo do estudo desenvolvido foi avaliar sistemas de alvenaria com juntas verticais secas e juntas horizontais de argamassa polimérica diante do desempenho acústico e da resistência ao fogo, verificando o comportamento diante destes requisitos de habitabilidade e segurança, respectivamente. Avaliaram-se três tipologias de sistemas verticais de vedação, sendo estes compostos por blocos cerâmicos, blocos cerâmicos tipo 6 furos e blocos de concreto. Verificou-se que o sistema composto por blocos de concreto apresentou desempenho superior aos demais nos dois critérios avaliados.

Palavras-chave: resistência ao fogo, desempenho acústico, alvenaria.

**Abstract**

The search for multicriteria performance currently intensify the completion of research that cover the analysis and development of conventional and innovative building systems in modern buildings. Thus, the challenge for the construction sector and sectors related is the concurrence in achieving the performance criteria with different relevant variables. In this scenario, the goal of the study developed was to evaluate masonry systems with dry vertical joints and horizontal joints of polymer mortar on the acoustic performance and fire resistance by checking the behavior on these habitability and safety requirements, respectively. Three types of vertical sealing systems were evaluated, which are composed of ceramic bricks, ceramic blocks (6 holes) and concrete blocks. It was found that the system composed of concrete blocks had outperformed the others in both evaluated criteria.

Keywords: fire resistance, acoustic performance, masonry.

## 1. INTRODUÇÃO

As regulamentações em vigor que tratam do desempenho de edifícios exigem projetos que atendam classificações específicas em diferentes requisitos, de modo que sejam satisfeitas condições de segurança e habitabilidade aos usuários, com edificações duráveis. A dificuldade

do setor de construção civil é a utilização de materiais que apresentem desempenho nos diferentes requisitos, visto que normalmente os fornecedores possuem um critério objetivado de alcance.

Sendo um sistema convencional de emprego difundido, o uso de paredes de alvenaria de blocos e tijolos se apresenta como uma solução simplificada para se alcançar os requisitos de resistência ao fogo, isolamento acústico e térmico, inclusive citados nas versões recentes de códigos e regulamentos alusivos ao desempenho das edificações [1].

No entanto, a variedade na composição dos materiais, na geometria dos blocos e nas espessuras dos revestimentos indica que os ensaios para a determinação do desempenho acústico e a resistência ao fogo desses sistemas construtivo devam subsidiar de forma constante a decisão de projetistas [1], [2], visto que tais definições podem influenciar no desempenho dos sistemas verticais, como as características relacionadas ao bloco, à argamassa de assentamento e ao revestimento. Assim, expõem-se a complexidade das análises considerando as variações nesses elementos, sendo que suas características não podem ser analisadas isoladamente para fins de classificações e garantia de desempenho acústico e resistência ao fogo. É vital ressaltar que a análise dos materiais impulsiona seu uso no mercado de maior exigência ao qual a construção civil se direciona.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS ALVENARIAS

As alvenarias são sistemas heterogêneos, cujas propriedades mecânicas apresentam distintos comportamentos, decorrentes das diferenças na microestrutura de cada material empregado nos sistemas [3], sendo aplicados com finalidade de vedação ou estrutural em edifícios de usos diversos. Os blocos e tijolos utilizados em paredes de alvenaria apresentam três variáveis básicas que podem influenciar no desempenho, mais especificamente no isolamento acústico e na resistência ao fogo: tipo de material empregado, geometria e espessura.

A argamassa de assentamento de alvenarias tem importantes funções na interface das unidades do sistema vertical de vedação estrutural ou não: distribuição mais uniforme das cargas por toda área resistente dos blocos, selagem das juntas para estanqueidade da parede e absorção das deformações decorrentes de variações térmicas e de retração por secagem [4].

Por motivos de racionalização dos processos construtivos, redução de custos e de prazos na execução da obra e de prevenção de fissuras devido a retração, a adoção de juntas verticais secas em sistemas de alvenaria estrutural começou a ser válida no Brasil no início da década de 1990. Nestes primeiros edifícios, no entanto, verificou-se a existência de fissuras, que posteriormente foram atribuídas aos esforços de cisalhamento pelo não preenchimento das juntas verticais entre os blocos da alvenaria [3]. Além disso, as juntas secas representam uma descontinuidade no elemento de vedação, que pode significar pontos frágeis para a transmissão do calor e do som.

Do ponto de vista acústico, as alvenarias podem apresentar comportamentos diferentes com variações decorrentes da massa por unidade de área do fechamento. Nesse sentido as alvenarias formadas por blocos vazados apresentam desempenho acústico inferior ao de alvenarias com elementos maciços.

Além da redução da massa, os elementos vazados apresentam ressonância nas cavidades em uma ampla faixa de frequências, o que reduz significativamente o desempenho global do sistema construtivo. Ainda que tais estudos tenham apresentado estes valores potenciais para os

diferentes blocos, visto que tal valor depende da geometria, da composição, dos processos empregados para sua confecção, tais ensaios devem ser realizados de acordo com os fabricantes, considerando estas variáveis. Além da análise dos blocos como variáveis, aspectos como o uso de argamassas poliméricas e de juntas secas carecem de estudo no cenário nacional, promovendo análise do desempenho destes sistemas favoráveis a racionalização das edificações.

Nas paredes de elevada inércia térmica, com espessura superior a 16 cm, a temperatura no lado não exposto ao fogo começa a aumentar após cerca de 60 minutos a partir do início do ensaio; subsequentemente, o efeito combinado de inércia térmica e migração da água mantém a temperatura da face não exposta num estado estacionário. A resistência ao fogo corresponde à um CF180. [5]

Por outro lado, nas alvenarias formadas por blocos vazados, o efeito da movimentação do ar aquecido nas cavidades acarreta em um comportamento diferenciado. A condução de calor, as mudanças de fase e a advecção (deslocamento horizontal da massa de ar) de calor devido à liberação de vapor são os principais mecanismos de dissipação que controlam a resistência térmica e dependem da geometria de tijolos. Nesses casos, o tamanho das cavidades é um parâmetro geométrico que afeta a duração da fase de platô, principalmente quando juntas de argamassa tradicionais são usadas. Isso significativa que a liberação de vapor não pode surgir devido a processos de vaporização e desidratação em argamassa de cimento aquecida. Em seguida, o vapor é liberado para as cavidades (alvéolos), que atenuam a transferência de calor devido à advecção. O efeito da argamassa também deve ser considerado, pois a temperatura no centro de um bloco vazado tende a ser superior a temperatura de argamassa. [6]

## 3 MÉTODO

### 3.1 Sistemas ensaiados

Foram analisadas três alvenarias com três diferentes tipos de blocos não estruturais. As juntas horizontais de assentamento foram preenchidas conforme recomendações do fabricante da argamassa, em dois filetes de 1 cm cada no sentido longitudinal da fiada, sem o preenchimento das juntas verticais. As três alvenarias foram revestidas com argamassa comum na espessura de 25 mm na face interna e 30 mm na face externa.

As composições das alvenarias ensaiadas foram as seguintes:

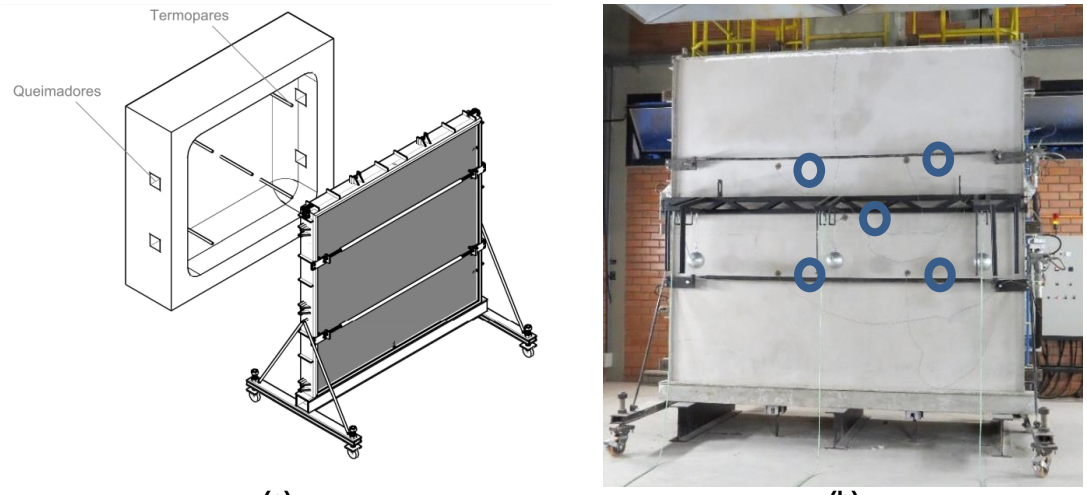
- blocos cerâmicos com furos na horizontal, espessura de 14 cm e massa 4,7kg
- blocos cerâmicos com furos na vertical, espessura de 19,5 cm e massa 7,5kg
- blocos de concreto com furos na vertical, espessura de 19,5 cm e massa 12,6kg

### 3.2 Determinação do índice de redução sonora

Os ensaios foram realizados no laboratório de acústica do itt Performance, seguindo os procedimentos prescrito pelas normas ISO 10140:2010, para o método de ensaio, e ABNT NBR 15575-4:2013, para a classificação de desempenho.

3.3 Determinação da resistência ao fogo

O método de ensaio utilizado foi o prescrito pela ABNT NBR 10636:1989 – *Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo*. O objetivo do ensaio foi verificar as características de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico do produto, bem como comportamentos específicos relevantes à segurança contra incêndio. Para tal, aplicam-se temperaturas padronizadas ao longo do tempo de acordo com a norma NBR 10636:1989.




**(a)** **(b)**

**Figura 1- (a) Conexão da unidade móvel com a amostra ao forno para realização do ensaio (b) amostra montada para a realização do ensaio**

3.3.1 Verificação do isolamento térmico

Para verificação do isolamento térmico do sistema, o forno possui cinco termopares fixos que medem a temperatura interna na superfície da parede, e cinco termopares na superfície da amostra para a coleta das temperaturas externa. Os termopares internos são do tipo K, com diâmetro de 4 mm, e os externos também são do tipo K, mas com diâmetro de 2mm. As posições dos termopares externos coincidem com os termopares internos e encontram-se em destaque na Figura 1b.

O ensaio foi monitorado ainda com câmeras termográficas para verificação do gradiente de temperatura apresentado pela amostra, conforme aponta a Figura 2. Através da geração destas imagens é possível verificar a progressão da temperatura na superfície das amostras, indicando ainda eventuais fragilidades.

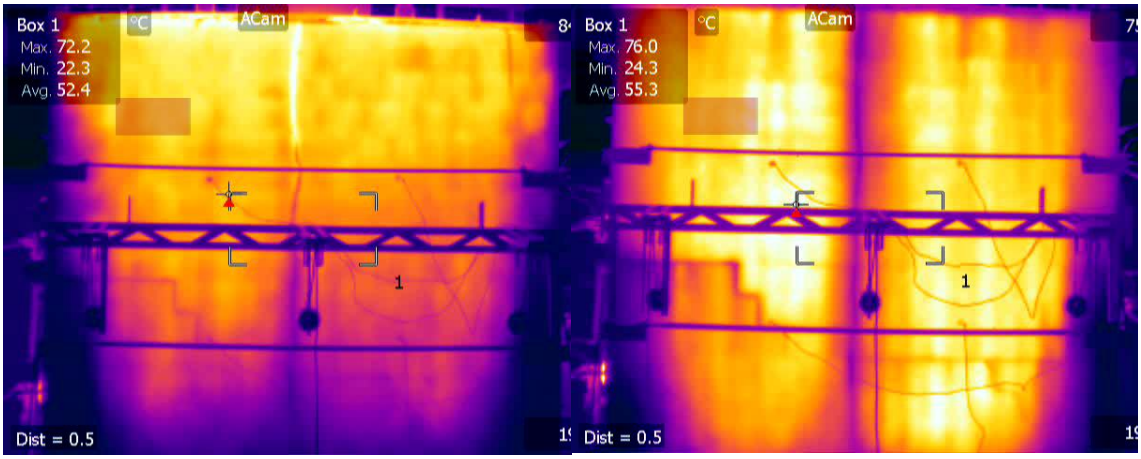



**Figura 2- Monitoramento do comportamento do sistema com câmera termográfica**

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Índice de redução sonora

Os resultados do índice de redução sonora dos sistemas analisados apresentam relação direta com a massa superficial do elemento utilizado nas alvenarias. A alvenaria composta por blocos de concreto apresentou um índice de redução sonora de 46 dB, sendo este o melhor resultado entre as amostras, correspondente ao sistema de maior massa específica. O menor índice de redução sonora (41 dB) foi verificado na alvenaria com blocos cerâmicos com furos na horizontal, cuja massa superficial é a mais baixa, dentre as três ensaiadas, verificando-se uma relação direta entre a massa específica e o desempenho acústico obtido através de ensaio. A Figura 3 apresenta o resultado obtido na realização do ensaio.

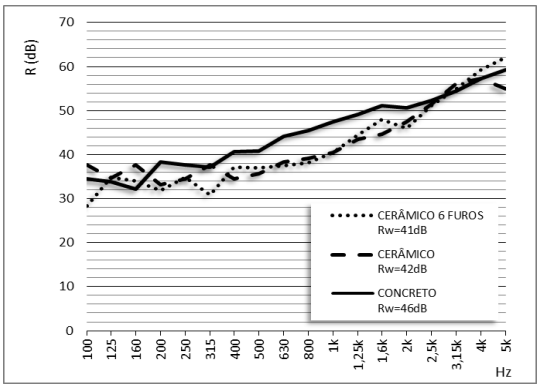



**Figura 3 - Resultados obtidos de índice de redução sonora**

Avaliando-se os resultados obtidos de acordo com os critérios estipulados pela ABNT NBR 15575: 2013 (Tabela 1) denota-se o comportamento satisfatório para usos diversos.

**Tabela 1 - Classificação dos sistemas de vedação de acordo com o índice de redução sonora**

| ELEMENTO | SISTEMA DE ALVENARIA DE BLOCOS | NÍVEL DE DESEMPENHO |
|---|---|---|
| Parede de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas de corredores, halls e escadaria nos pavimentos-tipo | Cerâmico 6 furos ($R_w$ 41 dB) | I |
| | Cerâmico ($R_w$ 42 dB) | I |
| | Concreto ($R_w$ 46 dB) | S |
| Parede de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadaria nos pavimentos-tipo | Cerâmico 6 furos ($R_w$ 41 dB) | N/A |
| | Cerâmico ($R_w$ 42 dB) | N/A |
| | Concreto ($R_w$ 46 dB) | M |
| Parede entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas | Cerâmico 6 furos ($R_w$ 41 dB) | N/A |
| | Cerâmico ($R_w$ 42 dB) | N/A |
| | Concreto ($R_w$ 46 dB) | N/A |
| Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação) | Cerâmico 6 furos ($R_w$ 41 dB) | N/A |
| | Cerâmico ($R_w$ 42 dB) | N/A |
| | Concreto ($R_w$ 46 dB) | M |

O sistema composto por blocos de concreto apresenta pelo menos desempenho mínimo em três das quatro possíveis, podendo ser utilizado para todos os fins, com exceção daqueles que envolvem o uso ou permanência de pessoas. Os demais sistemas, compostos por blocos cerâmicos com furos na horizontal e na vertical podem ser utilizados apenas para a primeira aplicação apresentada na Tabela 2, não atingindo desempenho mínimo para as demais.

4.2 Resistência ao fogo

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência ao fogo das amostras. Denota-se que de modo a viabilizar uma análise comparativa simples o parâmetro definido de observância foi o tempo em que o sistema manteve sua classificação de Corta-Fogo, ou seja, atendeu concomitantemente os requisitos de estabilidade estrutural, isolamento térmico e estanqueidade à passagem de gases e fumaça, conforme apresentado anteriormente.

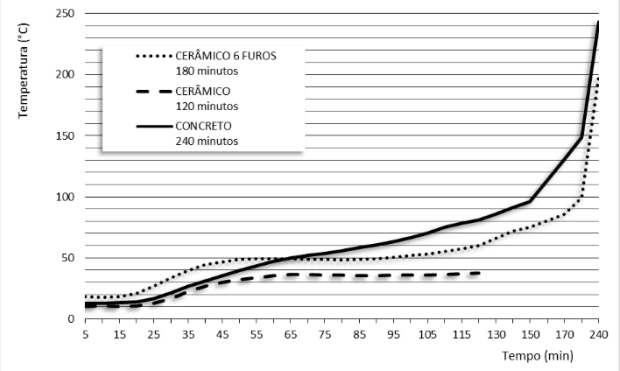



**Figura 4 - Resultados de ensaios de resistência ao fogo para as amostras ensaiadas**

Verifica-se através da Figura 04, que o sistema composto por blocos de concreto apresentou novamente desempenho superior às demais alvenarias avaliadas, classificando-se como CF240. O sistema composto por blocos cerâmicos com furos na horizontais (6 Furos) perdeu sua

característica de isolamento térmico ao transmitir à face não exposta temperatura superior à 180ºC, classificando-se como CF180, e mantendo suas características de para chama até 240min. O sistema de blocos cerâmicos com furos na vertical apresentou comportamento semelhante, classificando-se como CF120.

Propõem-se para melhor entendimento a Tabela 2, contendo síntese de classificação dos sistemas avaliados.

**Tabela 2 - Classificação dos sistemas de vedação de acordo com o índice de redução sonora**

| Sistema avaliado | Massa específica | Índice de redução sonora | Período de classificação como Corta Fogo |
|---|---|---|---|
| Concreto | 12,6 kg/m³ | 46 dB | 240min |
| Cerâmico | 7,5 kg/m³ | 42 dB | 120min |
| Cerâmico 6 furos | 4,7 kg/m³ | 41 dB | 180min |

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios, verificou-se que os sistemas apresentaram desempenho satisfatório em ambos os critérios avaliados.

A amostra de alvenaria composta por blocos de concreto que apresentou o maior índice de redução sonora também foi a que apresentou maior tempo de atendimento aos critérios estabelecidos de resistência ao fogo.

De modo contrário ao que ocorreu no ensaio de desempenho acústico, o período de resistência ao fogo não apresentou relação direta com a massa específica das diferentes amostras.

Verificou-se através desta análise baseada nos dois critérios que as três tipologias de alvenaria avaliadas apresentaram atendimento ao critério de CF mínimo de 120min, apontando ainda um valor mínimo de índice de redução sonora de 41dB.

Cabe destacar que diante destes resultados, a aplicabilidade dos sistemas é definida de acordo com as normas ABNT NBR 15575-4:2013 e ABNT NBR 14432:2001, para os índices de redução sonora e comportamento de resistência ao fogo, respectivamente.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

[1] T. D. Nguyen and F. Meftah: Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis. *Fire Saf. J.*, vol. 52, pp. 55–64, 2012.

[2] L. R. Richardson, R. A. Mcphee, and M. Batista: Sound-Transmission-Class and Fire-Resistance Ratings for Wood-Frame Floors. *Fire Mater.*, vol. 27, no. July 1998, pp. 17–27, 2000.

[3] F. A. dos Santos: Efeito do não preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural. UFSC, Florianópolis, 2001.

[4] H. Carasek: "Argamassas" in *Materiais de Construçao Civil*, 2nd ed., G. C. Isaia, Ed. São Paulo: IBRACON, 2010, pp. 893–944.

[5] S. Russo and F. Sciarretta: Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties - An overview. *Fire Saf. J.*, vol. 55, pp. 69–86, 2013.

[6] T. D. Nguyen and F. Meftah: Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. *Fire Saf. J.*, vol. 66, pp. 35–45, 2014.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem pelo apoio financeiro:

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS; e

- Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt PERFORMANCE da UNISINOS.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# SOLUCIONES DE ALTA EFICIENCIA ACÚSTICA PARA MEDIANERIAS Y ELEMENTOS DE SEPARACIÓN VERTICAL THERMOSILENCE M

PACS: 43.55.Ti

**Peinado Hernández, Fernando**[1] *(fernando.peinado@saint-gobain.com)*
**Bermejo Presa, Nicolás**[1] *(nicolas.bermejo@saint-gobain.com)*
**Somolinos Orejón, Adolfo**[2] *(adolfo.somolinos@saint-gobain.com)*
**Rubio Benito, Alberto**[3] *(Alberto.Rubio@weber.es)*
[1]Saint-Gobain Isover Ibérica, S.L.
Av. del Vidrio s/n, 19200 Azuqueca de Henares (Spain)
[2]Saint-Gobain Placo Ibérica
Plaza de los Tres Olivos 26, 28034 Madrid (Spain)
[3]Saint-Gobain Weber Cemarksa, S.A.
Área Empresarial Andalucía, Sector 1 C/ Las Marismas nº 11, 28320 Pinto (Spain)

## RESUMEN

Los elementos de separación verticales son aquellas particiones verticales que separan una unidad de uso de cualquier recinto del edificio o que separan recintos protegidos o habitables de recintos de instalaciones o de actividad.

En el caso de particiones verticales que separan dos viviendas entre si, una vivienda con zonas comunes del edificio o una vivienda con un recinto de instalaciones, es necesario garantizar las más altas prestaciones acústicas del elemento de separación, que permitan eliminar los ruidos y garantizar el confort de los usuarios.

Con el sistema THERMOSILENCE M para medianeras, se consiguen superar todos los requisitos de aislamiento térmico, acústico y protección contra incendios en una única solución constructiva.

## REQUISITOS ACÚSTICOS EN MEDIANERAS

La mejor defensa contra el ruido comienza por asegurarse que se toman las precauciones adecuadas cuando se diseña y se construye el edificio.

Cuando se diseña un edificio, es importante organizar las zonas para evitar la incompatibilidad de usos, con el fin de facilitar el correcto acondicionamiento acústico.
Las habitaciones deberían situarse lejos de las zonas más ruidosas del propio edificio (huecos de ascensores, salas de instalaciones, etc).

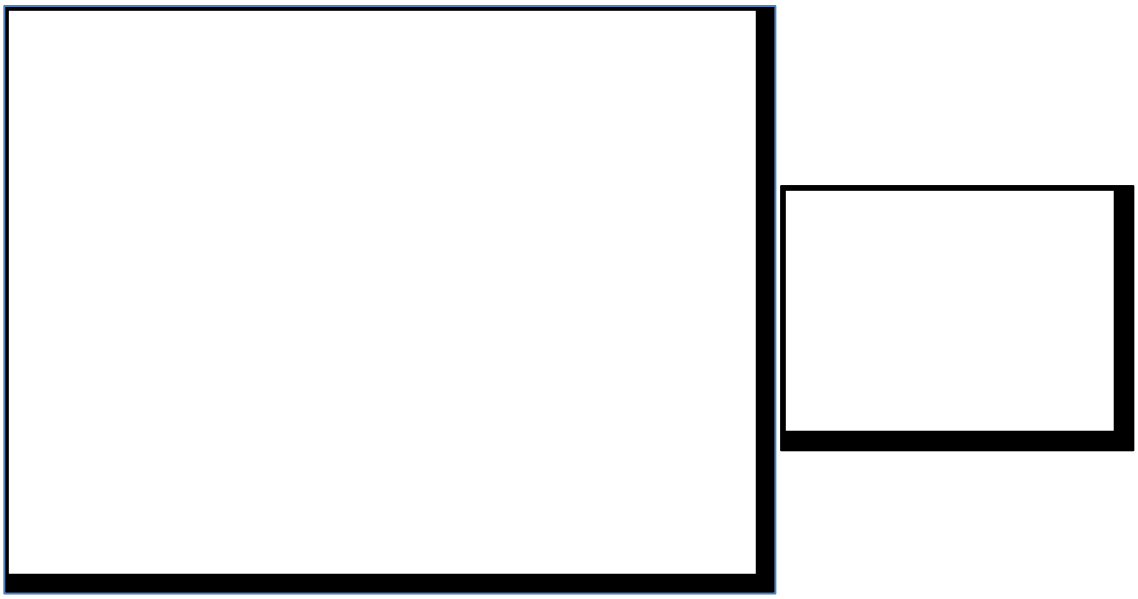
El código técnico de la edificación, en su documento básico DB-HR, establece los requisitos básicos y los procedimientos de verificación del cumplimiento de las exigencias relativas a ruido aéreo y en concreto, establece requisitos para las medianeras de los edificios ya que son la parte más sensible a la propagación del ruido entre viviendas, y por lo tanto, una de las partes en la que mejor deberemos de garantizar el aislamiento acústico.

Según la nomenclatura que emplea el DB-HR, las exigencias que deben de cumplir los edificios vienen determinadas en la siguiente tabla:



Las medianeras son particiones interiores verticales que separen distintas viviendas, y deben cumplir con unos valores de aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{nT,A} \geq 50$ dBA y en el caso de que sea la separación entre una vivienda y un recinto de instalaciones mayor $D_{nT,A} \geq 55$ dBA.

En la siguiente figura, se muestran los requisitos a cumplir:



El sistema THERMOSILENCE M aporta un aislamiento acústico $R_A = 61,6$ dBA.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y DE LOS COMPONENTES

THERMOSILENCE M es un sistema de medianería, con elevadas prestaciones de aislamiento acústico y térmico compuesto por un doble trasdosado con Placa de Yeso Laminado BA 15 y Lana Mineral Arena sobre ladrillo Arliblock 12.

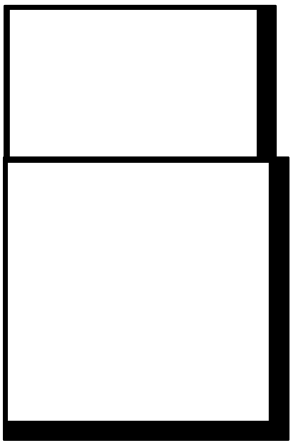


### Memoria descriptiva

Trasdosado autoportante PYL con Placa de Yeso Laminado **BA 15** de 15 mm y Lana Mineral **arena** de Isover en forma de paneles o rollos de 50 mm de espesor, con una conductividad térmica de 0,035 W/(m•K), clase de reacción al fuego A1, formado por una medianera de ladrillo **Arliblock** de 12 cm de espesor, prefabricado con arcilla expandida"Arlita Leca", enfoscado por ambas caras con 5 mm de mortero weber.rev hidro, con un peso total de 183 kg/m$^2$, y formado por una estructura metálica, placa de yeso laminado BA 15 de 15 mm de espesor.

### Principales componentes

1. LADRILLO **ARLIBLOCK 12**
   Ladrillo **Arliblock 12** ligero fabricado con la arcilla expandida Arlita® Leca®, cemento, árido natural, aditivos y agua.



2. LANA MINERAL ***arena***
   Paneles y rollos semirrígidos de lana mineral ***arena*** ISOVER, no hidrófilos, sin revestimiento.

3. **BA 15**

Placa de Yeso Laminado con cartón a doble cara y alma de yeso de origen natural.



**INSTALA A**

El Sistem s una técnica constructiva que permite una instalación ágil y sencilla.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Levantar el muro base con piezas de ladrillo Arliblock 12 que constituirá el elemento base portante entre viviendas y enfoscar ambas caras por el interior de forma uniforme y sin irregularidades con al menos un espesor de 0,5 cm de mortero weber. rev hidro (Aplicación en condiciones ambientales de 5ºC a 35ºC).



2. Colocar a ambos lados del muro base, con tacos expansivos, los raíles de chapa galvanizada en suelo y forjado, que actúan como soporte y guía de la perfilería Placo para colocar el trasdosado. Estos deben de estar adaptados al espesor de Lana Mineral ***arena***.
   El asiento del raíl inferior se realiza sobre una banda estanca de material elastomérico.



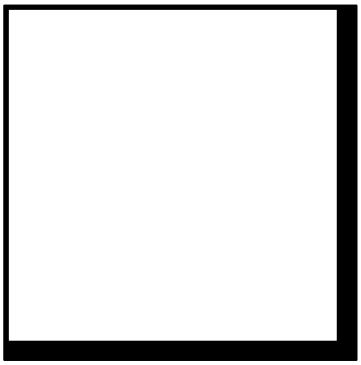
3. Colocar los montantes según el espesor de Lana Mineral arena que se instalará posteriormente. Los montantes se alojarán en los canales y se fijarán mediante un ligero giro para que queden sujetos.
   El sistema es apto para modulaciones de 400 y 600 mm de ancho. La estructura metálica debe quedar separada del muro de Arliblock al menos 1 cm.

4. Instalar la Lana Mineral arena de ISOVER. Paneles y rollos sin revestimiento, diseñados específicamente para conseguir las más altas prestaciones térmicas y acústicas en edificación.



5. Pasar los tubos de instalaciones.
   No es necesario ningún tratamiento adicional, el aislamiento se adaptará al tubo de instalaciones. No es necesario ni recomendable hacer rozas en la lana mineral.

6. Atornillar la placa BA 15. Se debe apoyar la placa en la estructura metálica de forma que el canto superior de la placa quede a tope con el forjado superior, de forma que la holgura de 1cm quedará en la parte inferior y se cubrirá con posteriormente con el rodapié. Finalmente proceder a encintar y sellar las juntas.



7. Repetir el trasdosado por la otra cara del muro base de Arliblock.

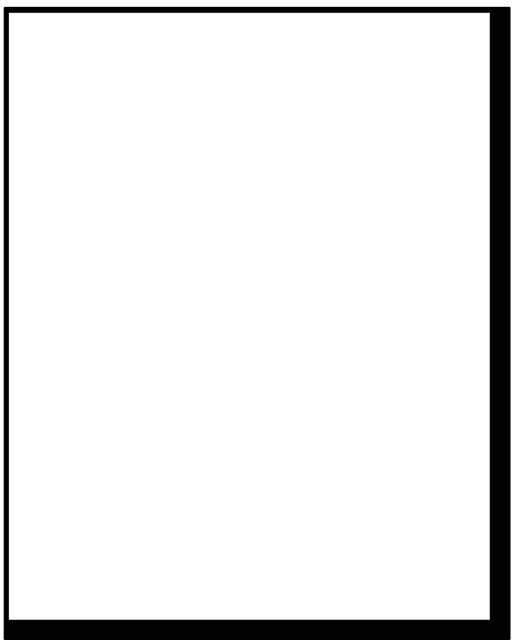
**ENSAYOS ACÚSTICOS**

Los ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo se han realizado aplicando las siguientes normas:

- Anexo G de la norma UNE-EN ISO 110140:2011.
- UNE-EN ISO 10140-2:2011
- Anexo B de la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011
- Anexo E del Documento Básico DB-HR Protección frente al ruido de abril 2009.

Los ensayos se han realizado en las salas de transmisión horizontal del Laboratorio de acústica de AUDIOTEC.

**Croquis de la muestra**



**Procedimiento de instalación de la muestra**

Sobre el portamuesta se construyó una fábrica de ½ pie de ladrillo ARLIBLOCK. El montaje se realizó con junta continua de mortero mineral en las juntas horizontal y vertical.

Posteriormente se aplicó 1 cm de mortero mineral por ambas caras.

Una vez terminado y secado el cerramiento portador, se realizó el ensayo acústico y posteriormente se procedió a instalar los revestimientos (trasdosados por ambas caras).

A ambos lados del cerramiento portador se realizó la fijación de los perfiles metálicos perimetrales de 48 mm (horizontales: canales y verticales: montantes a ejes de 600 mm) al marco mediante cordón continuo de silicona, interponiendo entre perfiles y el portamuestra una banda de estanqueidad. Se dejó una separación de 1 cm entre cada una de las estructuras y el cerramiento portador.

Seguidamente se instalaron los montantes en los canales cada 600 mm a ejes entre ellos.

Previamente al cierre de las estructuras auto-portantes se incorporaron en el alma de éstas los paneles de lana mineral de 50 mm de espesor.

A continuación se atornilló una cpa de placa de yeso laminado de 15 mm cerrando ambas estructuras.

Todas las juntas fueron debidamente encintadas y selladas. Los tornillos se sellaron con pasta de juntas. Se dejó una holgura de 5 mm entre las placas y el portamuestra, sellando ésta con pasta de juntas de forma que el cerramiento quedara hermético.

Una vez terminado y secado el cerramiento completo, se realizó el ensayo acústico.

El espesor final de la muestra fue de 28,1 cm, correspondiendo 13,5 cm al cerramiento portador y 14,6 cm a los revestimientos (trasdosados).

La masa superficial del cerramiento portador fue de 251,7 kg/m$^2$ y la del revestimiento de 24,2 kg/m$^2$, dando una masa total de 275,9 kg/m$^2$.

Las dimensiones de la muestra fueron 3,6 m de ancho por 2,8 m de alto. La superficie total de la muestra es de 10,08 m$^2$.

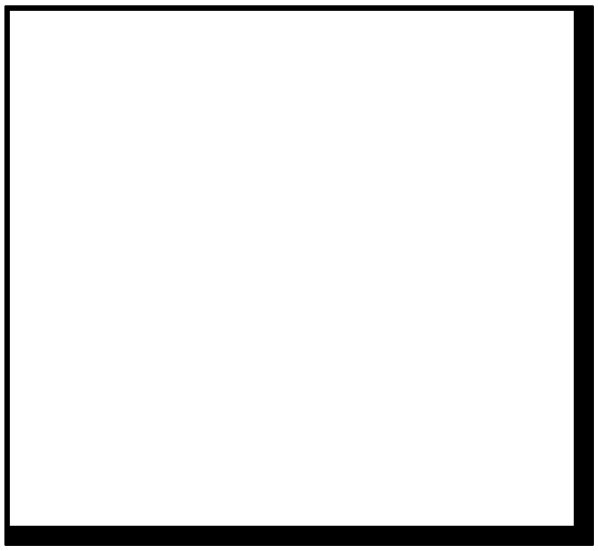
**Resultados**

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- Aislamiento acústico del cerramiento portador
- Aislamiento acústico de sistema completo (cerramiento portador + trasdosados)
- Valores de reducción acústica

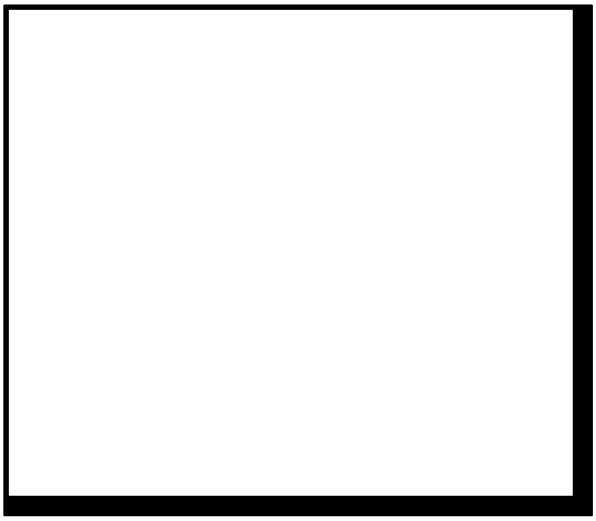
***Cerramiento portador***

$R_W\ (C;C_{tr}) = 53\ (-1;-5)\ dB$
$R_A = 52{,}5\ dBA$
$R_{A,tr} = 48{,}5\ dBA$



***Sistema completo***

$R_W\ (C;C_{tr}) = 65{,}9\ (-4;-3)\ dB$
$R_A = 61{,}6\ dBA$
$R_{A,tr} = 62{,}3\ dBA$



***Valores de reducción acústica***

$R_W\ (C;C_{tr})_{sin} = 53\ (0;-5)\ dB$
$R_W\ (C;C_{tr})_{con} = 66\ (-4;-4)\ dB$
$\Delta R_{W\ direct} = 13\ dB$

$\Delta(R_W+C)_{direct} = 9\ dB$
$\Delta(R_W+C_{tr})_{direct} = 14\ dB$



## CONCLUSIONES

El sistema THERMOSILENCE M para medianeras aporta un aislamiento a ruido aéreo de RA = 61,6 dBA, y consigue superar todos los requisitos de aislamiento térmico, acústico y protección contra incendios en una única solución constructiva.

## REFERENCIAS

[1] CTE DB-HR : Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Protección Contra el Ruido.

[2] SAINT-GOBAIN (ISOVER). Guide de prescription de l´isolation thermique et acoustique .

[3] UNE-EN ISO 10140-1:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1. Reglas de aplicación para productos específicos. Requisistos para instalaciones y equipos de ensayo.

[4] UNE-EN ISO 10140-2:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Medición del aislamiento al ruido aéreo.

[5] UNE-EN ISO 10140-4:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.Procedimientos y requisitos de medición.

[6] UNE-EN ISO 10140-5:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.

[7] UNE-EN ISO 3382-2:2008.

[8] UNE-EN ISO 717-1:2013: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

[9] UNE-EN ISO 717-1:1997/A1:2007: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Modificación : Normas de redondeo asociadas con los índices expresados por un único número.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# TÉCNICAS MODERNAS APLICABLES A LA OPTIMIZACIÓN ACÚSTICA DE OFICINAS ABIERTAS

**PACS: 43.55.Ka**

Notario Tévar, Antonio
Datakustik GmbH
C/ Calera 3, Loft 49
28760 Tres Cantos
España
+34 91 219 08 78
antonio.notario@datakustik.com

**ABSTRACT**

The primary focus during the acoustical planning of production facilities is to reach a low sound pressure level. Meanwhile, the distraction through understandable speech information is a main target during the acoustical optimization within open-plan offices. A technique based on the Sound Transmission Index according to IEC 60268-16 has been integrated into an acoustical planning system. The German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy supported the development of a software based procedure for the acoustical optimization of open-plan offices. This paper will illustrate the suitable steps to reach specific requirements for reverberation time and speech intelligibility within working groups.

**RESUMEN**

El objetivo principal de la optimización acústica en oficinas abiertas es reducir la distracción causada por conversaciones con información inteligible. En la presente comunicación se detalla la integración de una técnica basada en el Índice de Transmisión Sonora según la norma IEC 60268-16, promovida por el Ministerio de Asuntos Económicos Alemán, con el fin de proporcionar un procedimiento de optimización acústica de oficinas basado en simulación. A continuación se presentan los pasos necesarios para alcanzar requisitos suficientes de tiempo de reverberación e inteligibilidad de la palabra en equipos de trabajo, mientras se aseguran valores adecuados para grupos no interactivos.

## INTRODUCCION

En el planeamiento de oficinas abiertas, el objetivo principal es el de asegurar condiciones acústicas satisfactorias especialmente en lo relativo a la inteligibilidad y la palabra, por encima de otros objetivos más acordes con la realidad industrial. Dichas condiciones pueden ser diferentes y en algunos casos, contradictorias – mientras algunas áreas requieren una comunicación relajada, otras necesitan asegurar una cierta confidencialidad en las conversaciones de distintos grupos de trabajo. Para asegurar estas propiedades acústicas, es ventajoso predecir los parámetros acústicos más relevantes en el proceso de planificación. A continuación se muestran los pasos más importantes a seguir en la planificación acústica de espacios interiores mediante simulación, en la elección acústica del mobiliario necesario y en la optimización de alternativas.

## MÉTODOS DE CÁLCULO Y ESTRATEGIAS DE SOFTWARE

Los procedimientos descritos a continuación se han ejecutado aplicando el software CadnaR[1]. En concreto, se aplica una estrategia híbrida, la cual está basada en el uso de Ray Tracing determinístico para el cálculo de la propagación de sonido directa incluyendo efectos de apantallamiento, y de un método estadístico basado en partículas para calcular la propagación en función de un mayor orden de reflexión o de un tiempo de propagación definido que depende de un valor de precisión requerida para los resultados.

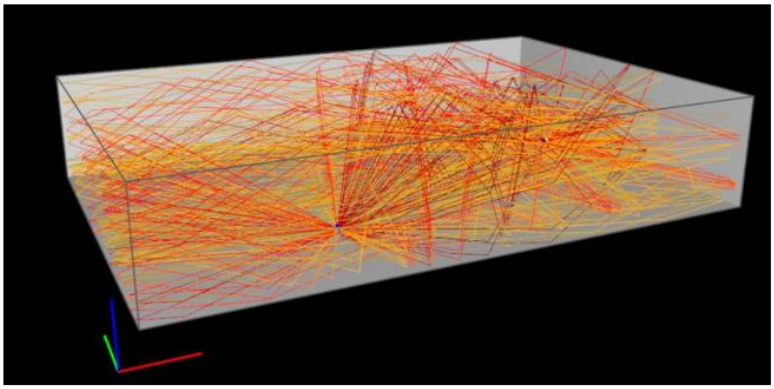


**Fig.1 –** Rayos acústicos calculados mediante el método de la fuente imagen (Ray-Tracing)

Con el método de partículas, el volumen acústicamente relevante es subdividido en pequeños volúmenes unitarios – llamados vóxels -, donde la energía de las partículas que los cruzan es sumada y las trayectorias promediadas con el fin de determinar la contribución a la densidad de energía final en esa posición. El tamaño de los vóxels define la resolución acústica e influencia al tiempo de cálculo necesario para mantener la incertidumbre estadística por debajo de ciertos límites.

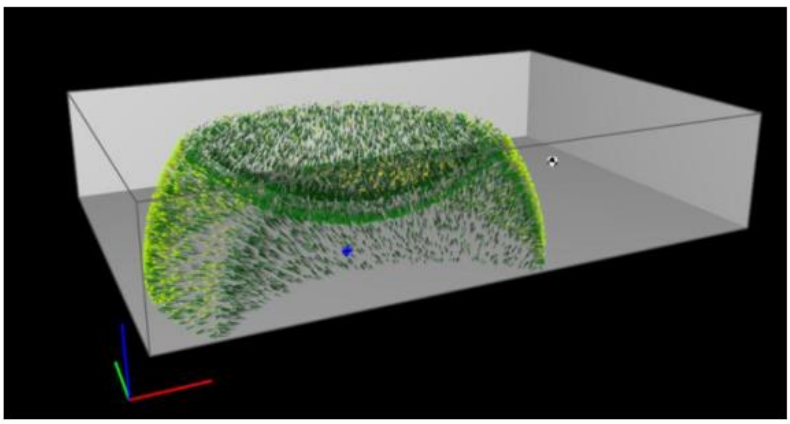


**Fig.2 –** Método de partículas. Distribución de las partículas después de la primera reflexión en techo y suelo

## LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DEL MOBILIARIO Y DE SUS UNIONES

Se considera suficiente incluir en el modelo virtual tanto los muebles como las uniones que sean acústicamente relevantes en función de su tamaño, así como caracterizarlos con sus valores de absorción, transmisión y dispersión en bandas de octava. Un nivel de detalle

exagerado no tiene ningún sentido y no supone una precisión añadida en el cálculo de los rayos. Por ello, tiene sentido aplicar técnicas de filtrado en software de simulación acústico en caso de que los modelos informáticos disponibles hayan sido creados con fines de visualización y planificación. Estos filtros deben considerar solamente las estructuras básicas, incluir sus parámetros acústicos y suprimir los detalles irrelevantes.

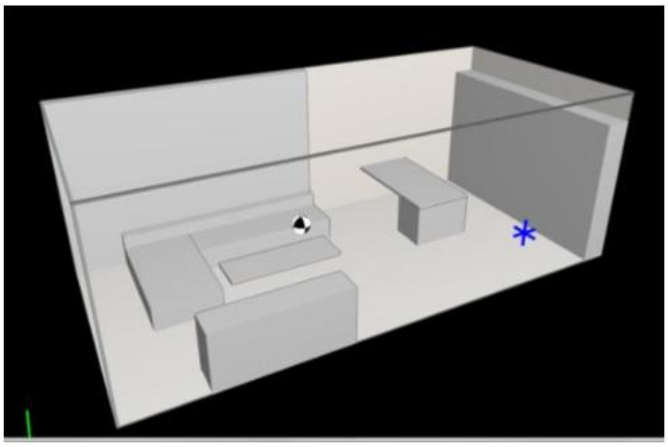


**Fig.3 –**Modelo simplificado de oficina

Teniendo en cuenta la importancia creciente de estas técnicas de simulación acústica es necesario incluirlas en el marco de la estandarización. Esto relaciona diversos aspectos como la descripción acústica de los materiales de construcción, la definición de criterios de calidad y la formulación de requisitos.

Un ejemplo típico es la definición del índice de absorción para módulos de techo en la nueva norma VDI 3755[2]. Estos módulos son superficies absorbentes suspendidas del techo de forma que existen huecos entre ellas. Debido a su distribución incluso su parte posterior contribuye a la absorción total del sistema.

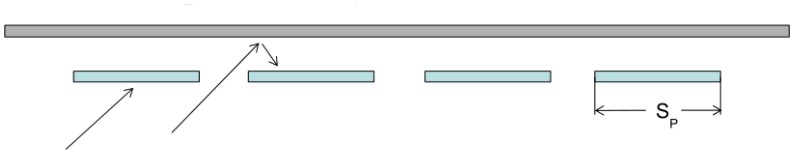



**Fig.4 –** La parte posterior de las planchas en el techo contribuyen a la absorción total – si el área de absorción equivalente determinada en cámara reverberante se relaciona con el área de una plancha $S_p$ los indices de absorción exceden 1

De acuerdo con la norma mencionada, el área absorbente equivalente A, determinada para una distribución de n módulos en una cámara reverberante, se divide por n para obtener la absorción de un único elemento y subdividido por el área de un lado de la superficie para obtener el $\alpha_{módulo}$. Los valores >1 han de aplicarse sin sustituirlos por 1. Si se incluyen estos elementos en la simulación acústica, los valores >1 no pueden tenerse en cuenta debido a que las partículas que chocan con la superficies sólo pueden ser absorbidas totalmente. No obstante, las partículas que atraviesan los huecos podrían ser absorbidas por la cara posterior de los elementos (por tanto no es necesario incrementar el coeficiente de absorción de la cara anterior para tener en cuenta la absorción de la cara posterior).

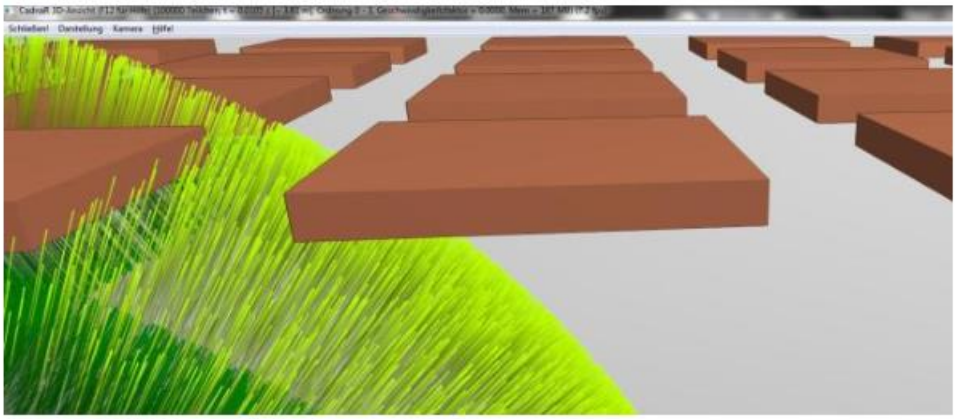


**Fig.5 –**Partículas atravesando una distribución de planchas absorbentes

Solamente existen dos formas correctas de describir estos sistemas. El primer método – cada vez más importante gracias a las técnicas de simulación – es describir una superficie singular mediante su coeficiente de absorción y el índice de dispersión para ambas caras independientemente, así como con el coeficiente de transmisión. Esto permite incluir sistemas con diferentes distancias, huecos y absorciones en la superficie. Por tanto, se puede calcular el comportamiento de los distintos sistemas sin necesidad de realizar mediciones independientes para cada uno de ellos.

El segundo método se basa en relacionar el área equivalente de absorción de un único elemento dispuesto en un sistema determinado con la proyección de la superficie $S_B$ del sistema para un elemento. Este coeficiente de absorción describe un sistema en concreto y no es una propiedad de la superficie individual.

En una simulación acústica, el sistema completo puede ser reemplazado por una superficie con un coeficiente de absorción medio. Esto es aplicable también a sistemas de bafles con paneles verticales o superficies.

## REQUISITOS ACÚSTICOS PARA OFICINAS DE ACUERDO CON LAS NORMAS Y SU APLICACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN

La norma DIN 18041[4] es un estándar que formula requisitos generales de salas, donde las oficinas constituyen un subgrupo (B4), dentro de los dos grupos empleados para clasificarlas (A y B). No obstante, si se desea alcanzar los valores de calidad acústica límites recomendados o requeridos para el cociente de la absorción equivalente y el volumen (A/V) así como requisitos adicionales, se recomienda la norma VDI 2569[5]

La norma VDI 2569 fija requisitos para:

- Tiempos de reverberación máximos aceptables
- Niveles de presión sonora máximos aceptables provocados por el edificio (e.g. instalaciones, pero no personas).
- Valores límite de parámetros característicos, que pueden derivarse de niveles de niveles de presión sonora medidos a lo largo de trayectorias de acuerdo con la norma ISO 3382-3[6] (disminución de nivel al doblar la distancia $D_{2,S}$ y nivel de presión sonora ponderado A $L_{p,\,A,\,S,\,4\,m}$ de la conversación en una distancia de 4m).

También se menciona la distancia de distracción $r_D$, siendo la distancia desde un altavoz de referencia hasta el punto donde el Índice de Transmisión de la Palabra STI, de acuerdo a la norma IEC 60628-16[7] ha caído a valores por debajo de 0.5.

En la fase de planificación, los valores de estos parámetros característicos deben ser determinados mediante técnicas de simulación o estimados en base a experiencias anteriores. En el caso del tiempo de reverberación, no existe problema alguno, ya que las técnicas de simulación anteriormente descritas permiten calcular la respuesta de la sala incluso en distintas posiciones y sin las limitaciones dadas por la teoría de Sabine – de acuerdo a EN 12354-6[8] -. También es posible calcular el STI a partir de los ecogramas teniendo en cuenta o no el ruido de fondo.

La determinación de los valores característicos derivados de las trayectorias de receptores es algo más complicada. Las trayectorias definidas en la ISO 3382-3 atraviesan puestos de trabajo que pueden estar separados por particiones y otros objetos apantallantes y, por tanto, la predicción de niveles debe tener en cuenta el sonido difractado. Para solucionar estas dificultades, se calcula el sonido directo desde el emisor a todos los receptores teniendo en cuenta todas las trayectorias de rayo posibles, así como la atenuación de acuerdo a la ISO 9613-2[9]. El sonido reflejado se simula mediante el modelo de partículas hasta un orden de reflexión o tiempo de propagación determinados. Esta estrategia permite calcular los parámetros derivados de las trayectorias de receptores en oficinas abiertas de cualquier complejidad.

Un ejemplo sería el modelo simplificado de una oficina que se muestra en Fig. 6. En ella, existe un área separada por una partición que sirve a modo de centro de comunicación, en la cual las conversaciones son confidenciales.

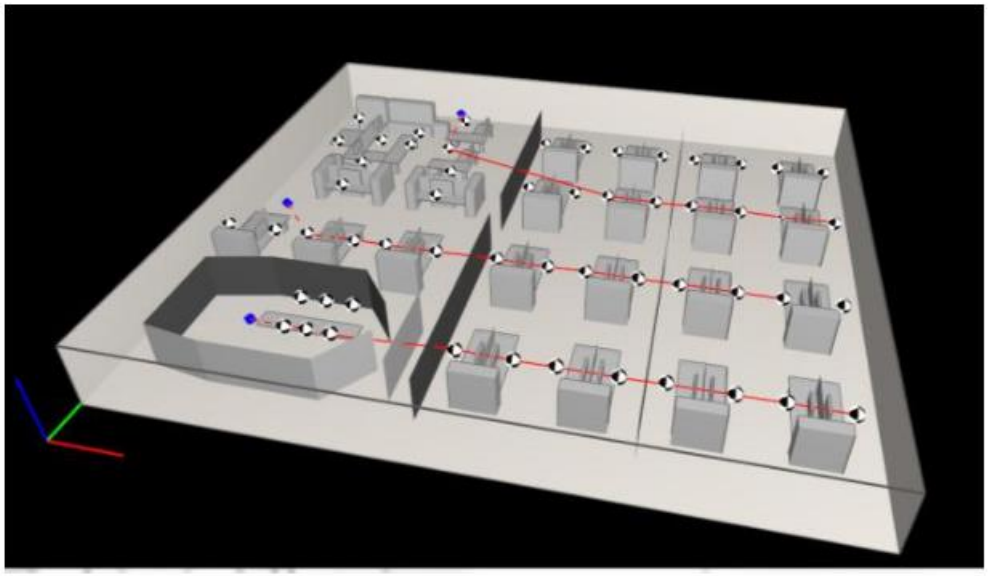


**Fig.6 –**Oficina abierta con muros separadores y 3 cadenas de receptores (rojo) para predecir los parámetros y clasificar la calidad del medio de acuerdo a VDI 2569

Las trayectorias mostradas en color rojo se establecen en el modelo virtual como cadenas de puestos de trabajo, asignando una fuente a cada una. El espectro de potencia sonora relacionado con la voz se asigna a cada una de las fuentes y el cálculo se ejecuta mediante una secuencia automatizada, cadena a cadena.

Asumiendo un techo suspendido absorbente, los diagramas de las figuras 7, 8 y 9 muestran los resultados correspondientes a la primera cadena, empezando a partir del área de comunicación.

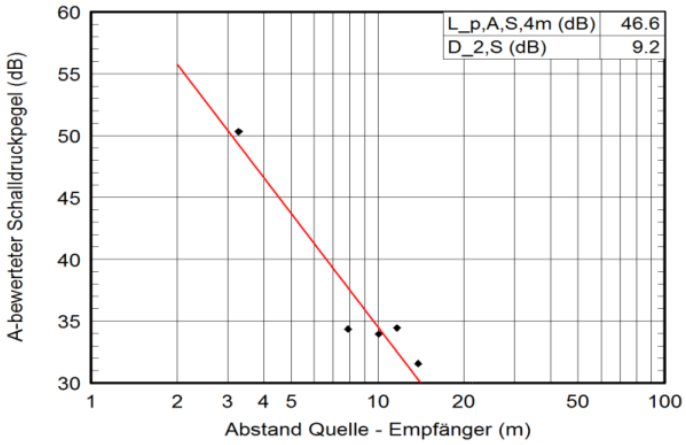



**Fig.7 –**Niveles acústicos a lo largo de la trayectoria 1, con $D_{2,S}$ y $L_{p,A,S,4m}$

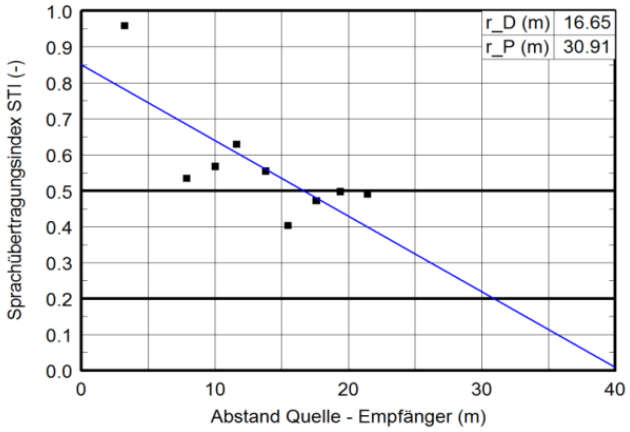



**Fig.8 –**Dependencia del STI en relación a la distancia calculada en los puntos de la cadena de receptores – La distancia de distracción es 16,65 m

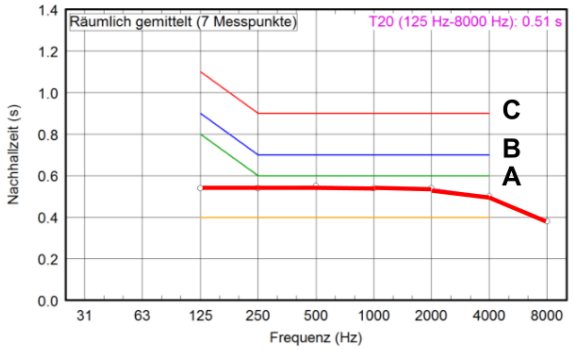



**Fig.9 –**Tiempo de Reverberación (Rojo) promediado en todos los puntos de la cadena de receptores, con los límites para las clases de sala A, B y C

## LA APLICACIÓN DEL STI

De acuerdo a la norma VDI 2569, el STI y la distancia de distracción no tienen en cuenta el nivel de ruido de fondo, incluso si es conocido o típico de una oficina abierta. El STI cuantifica en cierto modo la alteración de la modulación de la palabra debido a la reverberación y a otras señales acústicas no correlacionadas con la señal. Estos ruidos de fondo son la principal razón de que la inteligibilidad de la palabra disminuya si la intensidad de la señal también lo hace. El STI incorpora ambos efectos – la influencia de la reverberación y el ruido de fondo -. La figura 10 muestra la dependencia del STI del tiempo de reverberación (en el diagrama: "Nachhallzeit") y del SNR - la diferencia entre el STI y el ruido de fondo (en el diagrama: "Pegeldifferenz Sprachshall – Hintergrund") -. El cálculo de esta superficie de STI se basa en un campo sonoro difuso o en una caída de nivel lineal después de que la fuente cese su emisión.

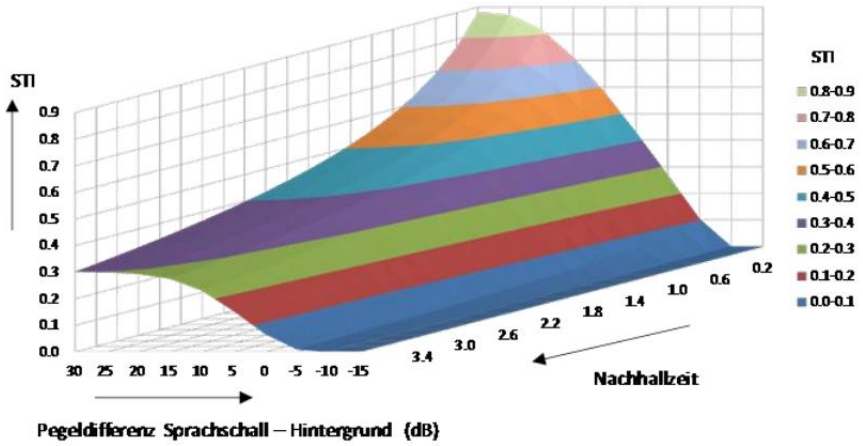



**Fig.10–**STI como función del tiempo de reverberación y de la diferencia de nivel señal – ruido de fondo

Si no consideramos el ruido de fondo, entonces el STI - respecto a una posición concreta del emisor - no depende del nivel de señal, y por tanto, sólo estará influenciado por una disminución de la modulación. Así pues, las pantallas o cualquier otro tipo de elemento atenuante tienen una influencia pequeña en el STI, debido a que reducen los niveles bajos y altos en la misma medida y por tanto, no influencian a la profundidad de la modulación. En realidad, las pantallas son apropiadas para reducir la inteligibilidad de la palabra, ya que reducen el nivel y por tanto, la diferencia entre la señal y el ruido de fondo es menor.

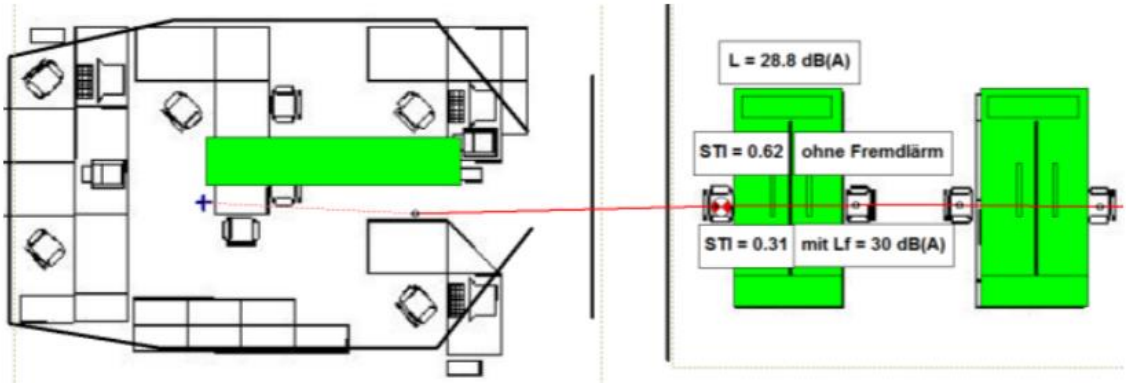



**Fig.11–**Evaluación de la inteligibilidad de la palabra desde el centro de comunicación al puesto de trabajo detrás de la pantalla a la derecha.

En la figura 11, se muestra un ejemplo donde el STI en el puesto de trabajo situado a la derecha ha sido calculado con la fuente de ruido en el interior de la zona de comunicación. La sala tiene una altura de 3 m y el techo es absorbente. Los puestos de trabajo están separados por una pantalla de 2 m de altura. Sin tener en cuenta el ruido de fondo, el puesto de trabajo está dentro del área de distracción. Sería entonces correcto concluir que no existe un nivel de privacidad suficiente y que lo hablado en el área de comunicación se entiende en el exterior. Pero si se tiene en cuenta un ruido de fondo de 30 dB(A) – valor bajo para este tipo de oficinas – el STI será entonces de 0,3. Este hecho está en línea con la experiencia: los elementos absorbentes y apantallantes ayudan a reducir el nivel de la señal y por tanto, la diferencia con respecto al ruido de fondo hará que otros sonidos influyan en la inteligibilidad.

## CONCLUSIONES

La norma VDI 2569 puede ser de ayuda como un sistema de clasificación general para oficinas, pero es recomendable tener en cuenta las necesidades individuales de inteligibilidad entre las distintas áreas de trabajo en el proceso de planificación de dichas oficinas.

El STI debe considerarse el parámetro más importante para clasificar ambientes de trabajo tales como oficinas, aulas y otras salas donde la inteligibilidad es importante. En el caso de oficinas abiertas existen grupos de trabajo que necesitan una comunicación relajada, mientras que grupos vecinos donde la inteligibilidad disminuye hace que su concentración decrezca y la molestia aumente.

Teniendo en cuenta estos aspectos tiene sentido clasificar el nivel de ruido de fondo considerado como no apto para áreas de trabajo típicas – mediante los percentiles $L_{90}$ o $L_{95}$ – y tomar estos valores como parámetros de entrada en las simulaciones si el STI es la base de futuras decisiones de diseño.

## REFERENCIAS

1. DataKustik GmbH, "CadnaR – Software for Interior Sound", www.datakustik.com
2. Guideline VDI 3755:2013 "Sound insulation and sound absorption of suspended ceilings"
3. Wolfgang Probst: “Sound Absorption of Baffle Systems” – Lärmbekämpfung Bd.3 (2008) Nr.2
4. E DIN 18041:2015-02 “Acoustic quality in small to medium – sized rooms”
5. VDI-Richtlinie 2569 E: “Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro”, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
6. ISO 3382-3 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters -- Part 3: Open plan offices
7. EC 60268-16: Sound system equipment; Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, ISBN 978-2-88912-522-7
8. EN 12354-6:2003 Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Sound absorption in enclosed spaces.
9. ISO 9613, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2 (1996-12): General method of calculation.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# PROPUESTA DE SOLUCIONES LIGERAS PARA AISLAMIENTO ACÚSTICO BASADAS EN NANOFIBRAS Y GREEN COMPOSITES

**PACS: 43.55Ev**

Del Rey Tormos, Romina[1]; Alba Fernández, Jesús[1]; Llopis Reyna, Ana[1]; Guillem Guillamon, Ignacio[1],
[1]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica. Universitat Politècnica de València.
C/ Paraninfo nº1, Grau de Gandia 46730 (Valencia). España.
E-mail: roderey@doctor.upv.es, jesalba@fis.upv.es

## ABSTRACT
Green Composites can be validated as absorbent acoustic materials or as part of airborne sound insulation solutions. In this work has been studied the improvement of airborne sound insulation using new solutions made from composite materials. The evaluated solution is composed by a green composite made from flax fibers, as lightweight element, and a material made from polyester fibers combined with nanofibers, as absorbent acoustic material. The airborne sound insulation results of this 100% recyclable solution are compared with the results obtained of several plasterboard solutions (common lightweight solution in the current building)

Keywords: Green Composites, nanofibers, Acoustic Isolation.

## RESUMEN
Los Green composites pueden ser validados como materiales absorbentes acústicos o como parte de soluciones a aislamiento acústico. En este trabajo se estudia la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo con nuevas soluciones tipo composites. La solución evaluada está formada por un green composite de fibras de lino como elemento ligero y fibras de poliéster combinadas con nanofibras como material absorbente. Se comparan los resultados de esta solución 100% reciclable con combinaciones de placas de yeso (solución ligera común al aislamiento acústico en la edificación actual).

Palabras clave: Green Composites, nanofibras, aislamiento acústico.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aislamiento acústico es uno de los requisitos a considerar en la construcción en España. Además, desde la publicación del Documento Básico de protección frente al ruido del Código Técnico de Edificación (Real decreto 1371/2007) [1], las exigencias para la comodidad de los ciudadanos han aumentado. Esto ha creado la necesidad de buscar nuevos materiales compuestos que cumplen con los nuevos códigos de construcción acústicas requeridas. Por otra parte, la conciencia sobre el uso de materias primas, el estudio de ciclos de vida y la re-utilización de recursos es cada vez mayor en toda la sociedad. Así se ha manifestado, en el '*HORIZONTE2020'*, H2020, Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea. En este programa marco se financian proyectos de investigación e innovación de diversas áreas temáticas en el contexto europeo y, concretamente, su Acción 5, '*Acción por el clima, medioambiente, eficiencia de los recursos y materias primas'*, plantea diferentes líneas de actuación. Una de ellas hace referencia a "*posibilitar la transición hacia una economía y una sociedad verdes a través de la ecoinnovación"* reforzando, entre otros, los productos ecoinnovadores. Así pues, dentro de este nuevo grupo de productos se pueden incluir ecomateriales elaborados a partir de desechos de otros procesos de fabricación, de fibras naturales o materiales reciclados que sean susceptibles de convertirse en materiales acústicos aplicables a la construcción.

El uso de fibras naturales para elaborar ecomateriales ha sido tema de estudio durante las dos últimas décadas [2-5], dando el nombre a estos nuevos materiales de Green Composites. Algunas de las ventajas que presentan las fibras naturales frente las fibras sintéticas es que son renovables, no abrasivas, más económicas, abundantes en la naturaleza y no se contamina durante la manipulación de las mismas.

En este trabajo se muestran resultados de mediciones en cámara de transmisión de tamaño reducido [6] de una solución ligera propuesta para aislamiento a ruido aéreo. La solución está formada por placas de green composites de fibras de lino (como capas impermables) y lana de poliéster reciclado con acabados de nanofibras (como material absorbente). Se enmarca dentro del proyecto BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT "Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables") que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER., dentro del Programa Estatal I+D+I orientada a los Retos de la Sociedad 2013.

## CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

En este apartado se muestran los resultados que nos conducen a pensar en la combinación "Green Composite+Poliéster Combinado con Nanofibra+ Green Composite" como posible solución ligera al aislamiento acústico, comparable con las tradicionales placas de yeso.

### TL en incidencia normal del Green Composite de Lino

El green-composite que se presenta como parte de la solución acústica en este trabajo, es un composite textil prácticamente 100% reciclable, ya que la resina que se utiliza para su elaboración es tipo epoxy [7]. Se han realizado ensayos de Transmission Loss (TL) en tubo de impedancia en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Gandia de la Universitat Politècnica de València (EPSG-UPV) [8], con tubos específicos fabricados al efecto. En la figura 1 se puede observar detalles de estos ensayos y en la figura 2 los resultados de los mismos.



*Figura 1.Detalles de ensayos del Green Composite utilizado en la solución de aislamiento a ruido aéreo. Ensayos de TL en incidencia normal. EPSG-UPV.*

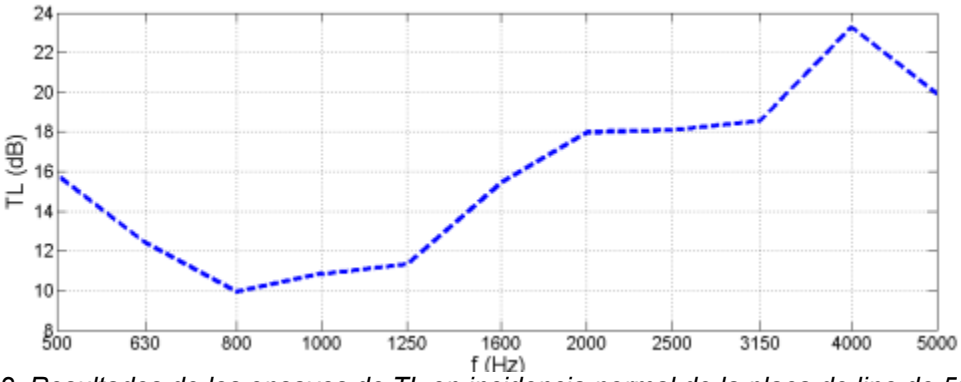
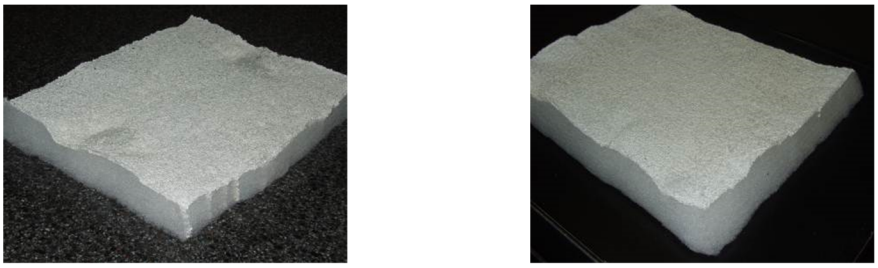



*Figura 2. Resultados de los ensayos de TL en incidencia normal de la placa de lino de 5mm de espesor.*

**Mejora de la absorción del PET con acabado de nanofibras**

Son conocidas las ventajas en la absorción sonora de recubrimientos con acabados de nanofibras sobre absorbentes de poliéster reciclado (PET) [9]. También en los laboratorios de la EPSG-UPV se realizaron una multitud de ensayos de la absorción sonora en incidencia normal [10] dentro del proyecto Europeo LIFE09-NOISEFREETEX [11], donde se pudo concluir, que después de concretar la combinación más adecuada de PET base con acabado de nanofibra, estas soluciones reducen el espesor efectivo del material, manteniendo sus características de absorbentes acústicos.

En la figura 3 se muestran algunos acabados de nanofibras, así como los valores del coeficiente de absorción en incidencia normal [10] de los absorbentes con acabados de nanofibras. Los detalles de cada uno de las combinaciones; tipo de nanofibra (ANY6, NY6, PETR) o densidad de la base de PET (400, 720 o 1200) [9]. En este trabajo se muestra como ejemplo para justificar su participación como absorbente en la solución propuesta como solución ligera al asilamiento de ruido aéreo.



A NY6+PEO_400 NY6+PEO_720

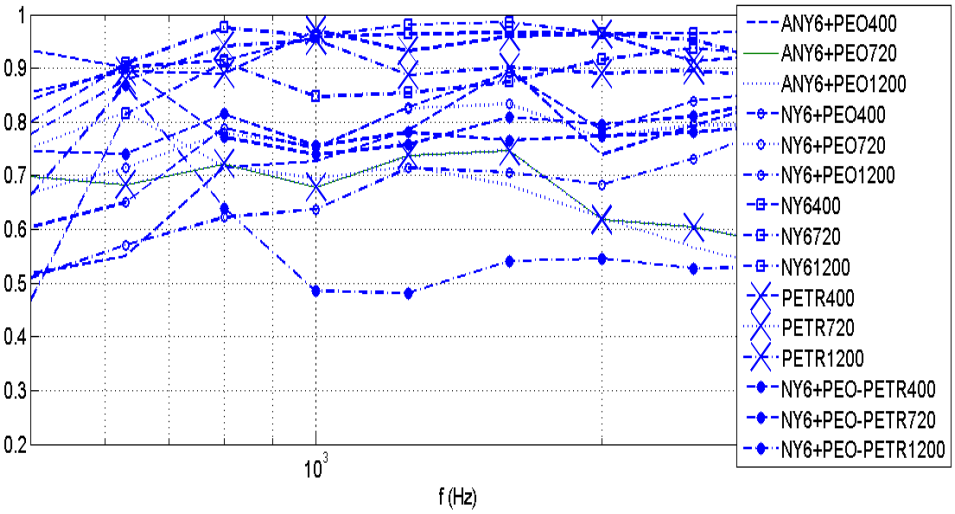



*Figura 3. Algunos ejemplos de base de poliéster reciclado con acabados de nanofibras (superior) y resultados de los ensayos de coeficiente de absorción en incidencia norma de éstos absorbentes.*

El reducido espesor de las placas de Green composites (de 3 y 5 mm), los valores de TL (dB) que se observan en la figura 2, junto con la experiencia conocida en acabados de nanofibras sobre textiles PET, nos hacen pensar en la combinación que se presenta en este trabajo como solución ligera al aislamiento de ruido aéreo.

**RESULTADOS: AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO. CÁMARA DE TRANSMISIÓN DE TAMAÑO REDUCIDO.**

Se muestran en este apartado los resultados del aislamiento acústico a ruido aéreo de las siguientes configuraciones:

1- Placa Green Composite 5mm + PET combinado con Nanofibra (30+30 mm) + Placa Green Composite 5mm
2- Placa Green Composite 3mm + PET combinado con Nanofibra (30+30 mm) + Placa Green Composite 3mm
3- Placa Green Composite 5mm + PET (sin Nanofibra) (40+40 mm) + Placa Green Composite 5mm
4- Placa Green Composite 3mm + PET (sin Nanofibra) (40+40 mm) + Placa Green Composite 3mm

Como absorbente de la solución propuesta se decide utilizar un sándwich de doble capa de PET con acabado de nanofibra de 30 mm de espesor cada una. Se realizan ensayos también de soluciones elaboradas a partir de PET sin nanofibras, para poder estudiar la influencia en el centro de la solución de la nanofibra. En este caso, los absorbentes son de mayor espesor (40

mm cada uno). En la figura 4 se observa algún detalle de las configuraciones con combinados de PET y nanofibras (superiores), así como detalles del portamuestras y de los ensayos en cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido.

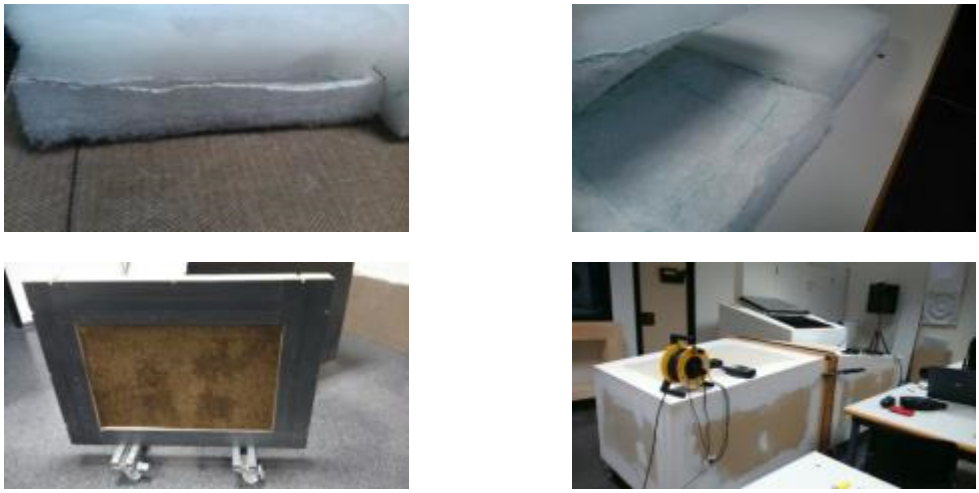


*Figura 4. Detalles de la placa de green composite junto con el PET combinado con nanofibras. Detalle del portamuestras y de los ensayos.*

La cámara de transmisión de tamaño reducido, o cámara de transmisión para muestras de pequeño tamaño es una herramienta fundamental en el campo de la caracterización de materiales todavía en fase de investigación y desarrollo. Detalles de la fabricación y puesta en marcha de la misma se pueden encontrar en algunas referencias [6] [12].

En las figuras 5 y 6 se muestran los valores del aislamiento a ruido aéreo que se obtiene a partir de los ensayos en cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido. Los valores se muestran a partir de los 400 Hz, ya que a frecuencias más bajas no podemos asegurar que los valores obtenidos sean comparables con ensayos normalizados [6] [12]. En la figura 5 se comparan los valores para las configuraciones 1 y 3; con nanofibra y sin nanofibra respectivamente y espesor de la placa de Green Composite 5mm. En la figura 6 se comparan los valores para las configuraciones 2 y 4; con nanofibra y sin nanofibra respectivamente y espesor de la placa de Green Composite 3mm.

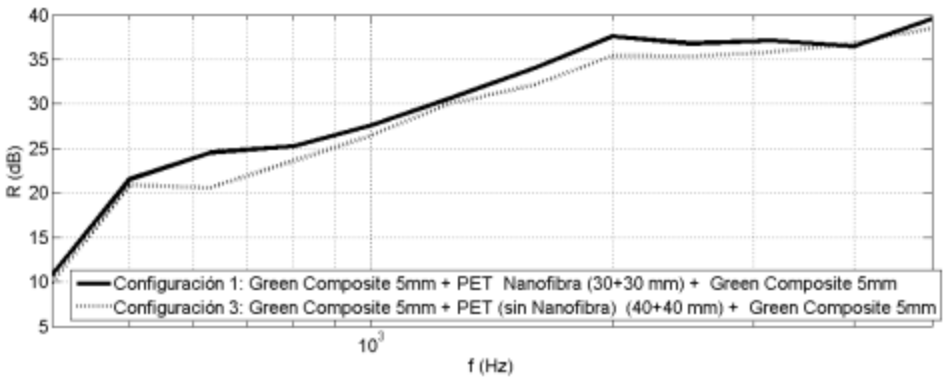



*Figura 5. Resultados de los ensayos realizados en la cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido. Comparativa entre absorbente CON/SIN nanofibra. Espesor de la placa de Green composite 5mm.*

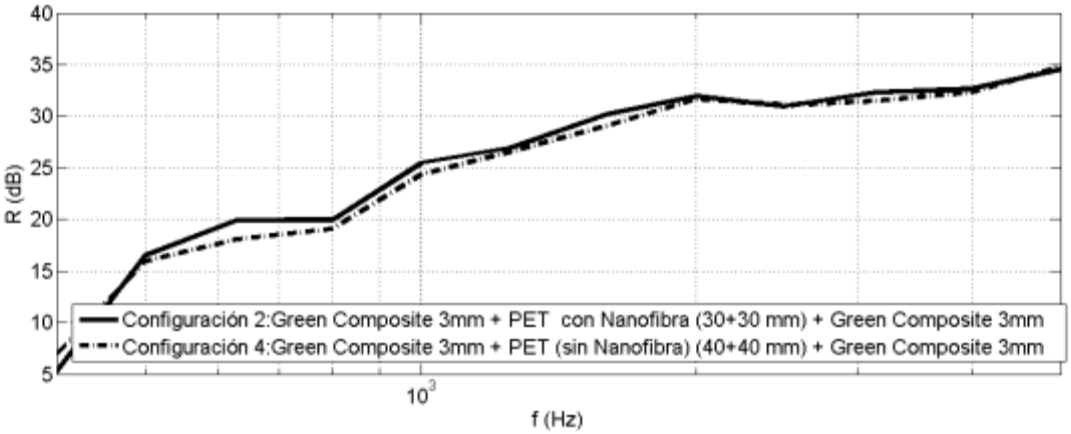



*Figura 6. Resultados de los ensayos realizados en la cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido. Comparativa entre absorbente CON/SIN nanofibra. Espesor de la placa de Green composite 3mm.*

Se decide realizar una estimación del índice de reducción ponderado Rw [12]. Este valor, para el caso de las configuraciones 1, 2, 3 y 4 (C1, C2, C3 y C4) no refleja exactamente el significado del valor global que especifica la norma [13]. En la norma se consideran frecuencias por debajo de 400 Hz para el cálculo de este valor global. No es el caso de las configuraciones C1, C2, C3 y C4. En la figura 7 se compara este valor global para las 4 configuraciones con Green Composite, con placa de yeso común. Para especificar que lo cálculos no son estandarizados, se denota el valor global con un asterisco (Rw*).

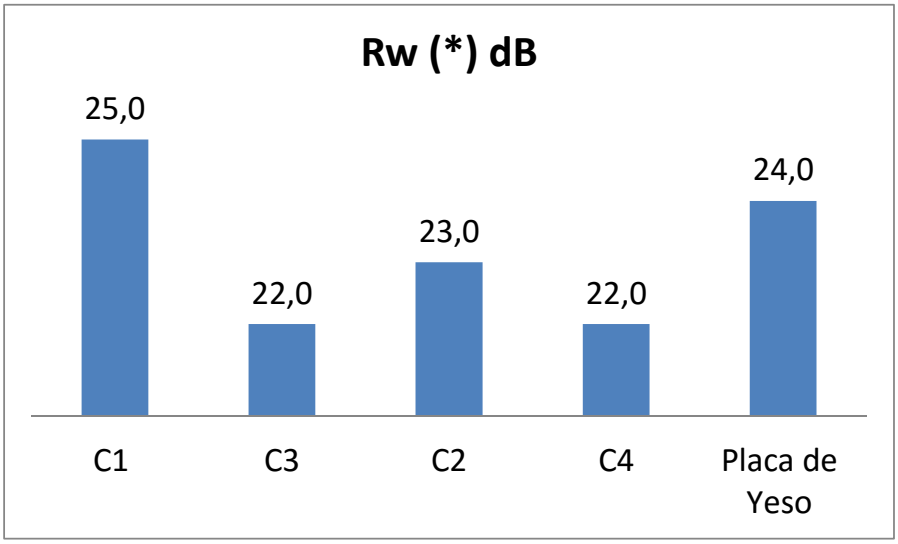



*Figura 7.Comparación de valores globales (*) del aislamiento de las 4 configuraciones expuestas e este trabajo con placa de yeso comúnmente utilizada como solución ligera al aislamiento acústico.*

**CONCLUSIONES**

En este trabajo se propone una combinación de Green Composites y absorbentes con acabados de nanofibras como solución ligera al aislamiento acústico a ruido aéreo. En concreto, las placas de Green Composites son placas de fibras textiles (lino) de 3 y 5 mm de espesor. Como material absorbente se elige una estructura doble de poliéster reciclado de 30 mm de espesor con

nanofibras en su parte central. Son conocidas las pérdidas por transmisión en incidencia normal de las placas de lino (figura 2), así como la absorción sonora en incidencia normal del PET con recubrimiento de nanofibras (figura 3).

Para evaluar el comportamiento de la combinación que se propone como solución ligera, se realizan ensayos en cámara de transmisión de tamaño reducido. Los resultados son comparados con la misma configuración sin nanofibras (figuras 5 y 6). Se observa en estas figuras que existe un ligero aumento en los valores del aislamiento a ruido aéreo al introducir las nanofibras en el caso de la placa de composite de 5mm, pero no se puede apreciar mejora para las configuraciones elaboradas a partir de composite de lino de 3 mm de espesor.

Se realiza una estimación del valor global (*) y se compara con datos de yeso laminado, solución ligera al aislamiento acústico muy común en edificación. Se observa que en todo caso, el valor de Rw* de la configuraciones con el acabado de nanofibras está por encima que en el caso de las configuraciones sin nanofibra: 25 dB frente 22 dB en el caso de configuración con placa de lino de 5mm, y 23 dB frente 22 dB en el caso de configuración con placa de lino de 3mm. Además, se supera en algunos casos (Configuración 1) el valor del índice global para la placa de yeso laminado.

Los resultados nos indican que la combinación presentada en este trabajo se comporta como una solución al aislamiento acústico, con la ventaja de ser, prácticamente 100%. Como líneas futuras, es necesario establecer la influencia de la posición del acabado de nanofibra dentro de la solución en el valor del aislamiento acústico, así como intentar reducir el espesor del absorbente.

**AGRADECIMIENTOS**

En este trabajo se presentan resultados del proyecto BIA2013-41537-R (BIAEFIREMAT "Desarrollo de nuevos eco-materiales y soluciones constructivas sostenibles para edificación basado en el uso de residuos y materias primas renovables") que está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y cofinanciado con fondos FEDER., dentro del Programa Estatal I+D+I orientada a los Retos de la Sociedad 2013.

**REFERENCIAS**

[1] Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación (DB-HR del CTE)

[2] Habibi, Y., El-Zawawy, W. K., Ibrahim, M. M., and Dufresne, A. (2008). "Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from Egyptian agro-industrial residues," Compos. Sci. Technol. 68(7-8), 1877-1885

[3] López, J. P., Mutjé, P., Pèlach, M. À., El Mansouri, N.-E., Boufi, S., and Vilaseca, F. (2012). "Analysis of the tensile modulus of polypropylene composites reinforced with stone groundwood fibers," *BioResources* 7(1), 1310-1323

[4] Serrano A., Espinach F.X., Julian F., del Rey R., Mendez J.A., Mutje P. Estimation of the interfacial shears strength, orientation factor and mean equvalent intrinsinc tensile strength in old newspaper fiber/polypropylene composites. Composites part B, 50, 232-238 (2013))

[5] J. Alba, R. del Rey, JM Gadea, J Segura, E Julià.Estudio de nuevos materiales composites para soluciones ligeras al aislamiento acústico. IX Congreso Iberoamericano de Acústica. FIA 2014. Valdivia. Chile.

[6] Del Rey R., Alba J., Bertó L., Hervás C., Sanchis V. (2012c). 'Construcción de un tubo de impedancia para la medida da de las pérdidas por transmisión'. VIII Congreso Ibero-Americano de Acústica. Évora-Portugal.

[7] Use of eco-Friendly Epoxy Resins From Renowable Resources as Potential Substitutes of Petrochemical Epoxy resins for Ambient Cured Composites with Flax Reinforcements.

D. Bertomeu, D. García-Sanoguera, O. Fenollar, T. Boronat, R. Balart. Polymer Composites, 2012.

[8] R. Reixach a, R. Del Rey b, J. Alba b, G. Arbat c, F.X. Espinach d,⇑, P. Mutjé e. Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards. Construction and Building Materials 77 (2015) 124–129

[9] Romina Del Rey, Jesús Alba, Maria Blanes, Korina Molla, Bruno Marco, Enrico Fallarella, Francesca Peruzzi, Vicente Sanchis, Felipe Carrasco. Soluciones demostrativas para reducir la contaminación acústica en las áreas industriales mediante la utilización de tecnologías de acabados en los materiales textiles: PROYECTO LIFE09/ENV/ES/000461-NOISEFREETEX. Revista de Acústica, V45, N3 y 4.

[10] UNE EN ISO 10534-2:2002. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2. Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998)

[11] Project LIFE09 ENV/ES/461: NOISEFREETEX. http://noisefreetex.aitex.net/

[12] Bertó Carbó, Laura. Nuevos materiales, modelos y técnicas de caracterización en acústica en la edificación y acústica ambiental. Tesis Doctoral – 2015.

[13] UNE EN ISO 717-1:2013. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. (ISO 717-1:2013)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS EM FACHADAS ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS *IN SITU*

PACS: 43.55-n

Helder Miguel Gonçalves Martins[(1)]; Marco Antunes Mateus[(2)]; Carlos César Rodrigues[(3)]
[(1)] Inst. Politécnico Castelo Branco; [(2)] Acustalbi, Lda.; [(3)] Instituto Superior Engenharia Lisboa
[(1)] Av. Pedro Álvares Cabral, 12; 6000-084 Castelo Branco; Portugal; Tel: (+351) 272339600; Fax: (+351) 272339601; helder_martins@ipcb.pt
[(2)] Av. da Carapalha, 5 r/c Dto.; 6000-320 Castelo Branco; Portugal; Tel: (+351) 272322131; geral@acustalbi.com
[(3)] Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; crodrigues@adf.isel.pt

## ABSTRACT

The Portuguese legislation on Building Acoustics set minimum limits for the airborne sound insulation of building facades, which have to be verified by *in situ* acoustic tests performed by accredited acoustic laboratories.

In this paper, the authors will present statistical analysis of an important set of experimental results obtained, *in situ*, by an accredited acoustic laboratory, for the legal parameter $D_{2m,nT,w}$, in terms of the buildings typology and separating new or rehabilitated buildings from existing ones.

In this communication the authors will also present the comparison between the *in situ* results and the legal limits.

## RESUMO

A legislação portuguesa sobre Acústica de Edifícios, designadamente o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, impõe limites mínimos para o isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, devendo a respectiva verificação experimental ser realizada *in situ* por laboratórios acreditados em acústica.

Neste artigo, os autores apresentarão a análise estatística de um conjunto importante de resultados experimentais obtidos, *in situ*, por um laboratório acreditado em acústica, para o parâmetro legal $D_{2m,nT,w}$, em função da tipologia das edificações e separando edifícios novos ou reabilitados de edifícios existentes.

Nesta comunicação será, ainda, apresentada a comparação efectuada pelos autores entre os resultados *in situ* e os correspondentes limites regulamentares.

## 1. INTRODUÇÃO

O índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, $D_{2m,nT,w}$, é um dos requisitos exigidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), publicado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio e alterado e republicado pelo Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho.

O valor deste requisito depende do tipo de edificação e da sua localização em zona acusticamente classificada como zona sensível ou zona mista. Trata-se de um requisito importante para o bem-estar das pessoas no interior dos edifícios, nomeadamente em zonas cujo ruído ambiente é elevado.

Em virtude da sua importância, pretendem os autores com o presente artigo averiguar a situação actual dos edifícios novos ou reabilitados e dos edifícios existentes, em termos médios e em comparação com os valores regulamentarmente estabelecidos. Será, ainda, analisada a influência do valor da incerteza indicada na legislação aplicável em termos do cumprimento deste requisito.

Para o presente estudo foram utilizados 306 resultados de ensaios realizados *in situ* por um laboratório acreditado em acústica pelo Instituto Português de Acreditação, I.P., os quais foram alvo de emissão de relatório.

## 2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

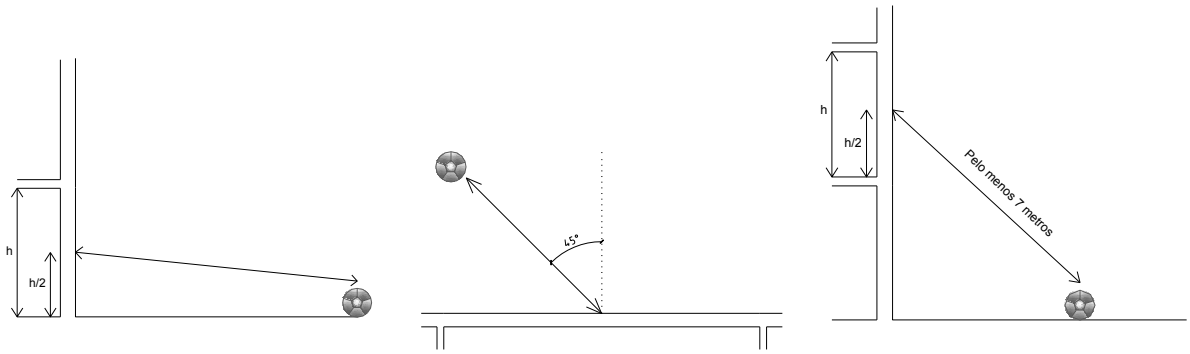
Os ensaios realizados para a determinação, *in situ*, do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, foram efectuados de acordo com o procedimento técnico do laboratório, o qual se encontra em conformidade com o estabelecido nas normas NP EN ISO 140-5:2009, NP EN ISO 717-1:2013, NP EN ISO 3382-2:2011, RRAE, bem como nos critérios de amostragem LNEC.

A instrumentação utilizada para a realização dos ensaios consistiu no sonómetro integrador de classe 1 da 01dB Solo, no calibrador sonoro da Rion NC-74, no amplificador de potência da 01dB e na fonte sonora para sons aéreos da 01dB. Os equipamentos encontram-se devidamente calibrados e verificados de acordo com as disposições legais e normativas em vigor.

As medições acústicas foram realizadas em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequências de 100 a 3150Hz, utilizando emissão de ruído branco.

O ensaio é composto pelas seguintes medições:

- 3 leituras do ruído emitido pela fonte sonora no exterior do edifício, medido a 2 metros de distância da fachada do mesmo, com a fonte sonora a emitir ruído branco numa incidência na fachada em análise de 45±5º e a uma distância de 7 metros da mesma, conforme se ilustra na Figura seguinte




Fachada R/C Lateral | Fachada R/C Planta | Fachada 1º Andar

Figura 1 – Posicionamento da fonte sonora no exterior do edifício

- 5 leituras do ruído recebido no compartimento receptor, distribuídas de forma aleatória, garantindo-se um afastamento entre as mesmas de pelo menos 0,7 metros e de 0,5 metros às fronteiras do compartimento

- 5 leituras do ruído de fundo característico do compartimento receptor, nas mesmas posições em que foi medido o ruído recebido

- 3 leituras do tempo de reverberação característico do compartimento receptor, com 2 decaimentos por ponto, tendo sido aplicado o método da fonte interrompida

Posteriormente, os resultados obtidos *in situ* são pós-processados em laboratório, sendo efectuada a correcção do ruído de fundo, em função da diferença entre o nível sonoro recebido e o nível sonoro do ruído de fundo, determinando-se o nível de isolamento sonoro padronizado por recurso à expressão seguinte:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10\log\left(\frac{T}{T_0}\right)\ dB$$

Em seguida, é efectuado o ajuste à curva padrão, de acordo com o estabelecido na norma NP EN ISO 717-1:2013 e aplicando-se o termo C ou $C_{tr}$, em função da percentagem de área envidraçada da fachada em análise.

## 3. RESULTADOS

O gráfico ilustrado na Figura seguinte mostra a distribuição dos ensaios em função da utilização dos edifícios.

Pode verificar-se que os ensaios em edifícios habitacionais (que também inclui as unidades hoteleiras) representam 56% da amostra, os edifícios destinados a comércio 31%, os de escritórios 10% e os outros, como indústrias, armazéns, etc. cerca de 3%.

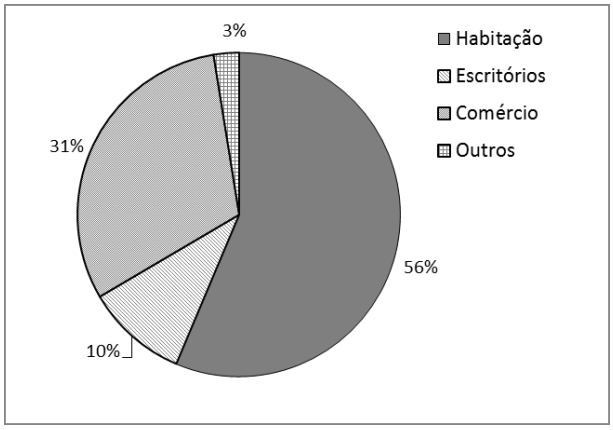



Figura 2 – Distribuição dos ensaios efectuados em função da utilização dos edifícios avaliados

### 3.1 Edifícios Habitacionais

O gráfico da Figura seguinte apresenta a distribuição dos resultados do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, corrigido com o termo C ou $C_{tr}$ e acrescido do valor da incerteza (I = 3dB), indicado no RRAE.

Diferenciam-se edifícios novos ou reabilitados e edifícios existentes (edifícios que foram construídos e/ou projectados antes de 2002).

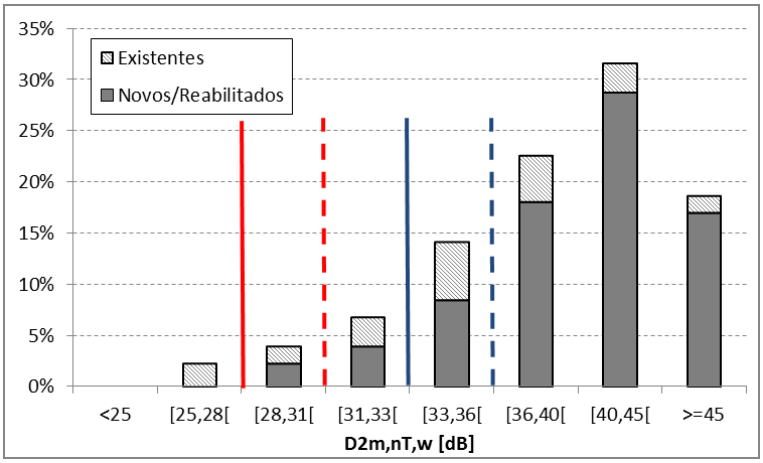



Figura 3 – Valores de $D_{2m,nT,w}$ obtidos nos ensaios efectuados em edifícios habitacionais

Verifica-se, desde logo, que a maioria dos ensaios realizados ocorreram em edifícios novos ou reabilitados.

As linhas verticais contínuas, vermelha e azul, representam, respectivamente, os limites regulamentares para as zonas definidas no Regulamento Geral do Ruído (RGR), publicado pelo Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro, como sensíveis e mistas. As linhas interrompidas representam os valores regulamentares acrescidos da incerteza (3dB).

O valor médio e desvio padrão do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas da amostra é de 39,3dB e 5,82dB, respectivamente, com uma mediana de 40dB.

Considerando o índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas com o acréscimo da incerteza, verifica-se que em 2,5% dos ensaios não é cumprido o requisito para zonas

sensíveis e que em 13% dos mesmos não é cumprido o requisito para zonas mistas. No entanto, caso a legislação não permitisse o acréscimo da incerteza, o incumprimento passaria para 6,2% e 27%, respectivamente, o que traduz um aumento para cerca do triplo dos casos em incumprimento.

Verifica-se que os resultados mais fracos correspondem a edifícios existentes, com caixilharias de vidro simples, enquanto que o melhor desempenho é verificado nos edifícios novos ou reabilitados.

### 3.2 Edifícios Comerciais

O gráfico da Figura seguinte apresenta a distribuição dos resultados do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, corrigido com o termo C ou $C_{tr}$ e acrescido do valor da incerteza (I = 3dB), indicado no RRAE.

Diferenciam-se edifícios novos ou reabilitados e edifícios existentes (edifícios que foram construídos e/ou projectados antes de 2002).

Nesta tipologia de edifícios, a percentagem de edifícios existentes é muito superior aos novos ou reabilitados. Tal deve-se ao facto de a maioria dos ensaios solicitados serem para licenciamento de actividades e estas se desenvolverem em edifícios já existentes.

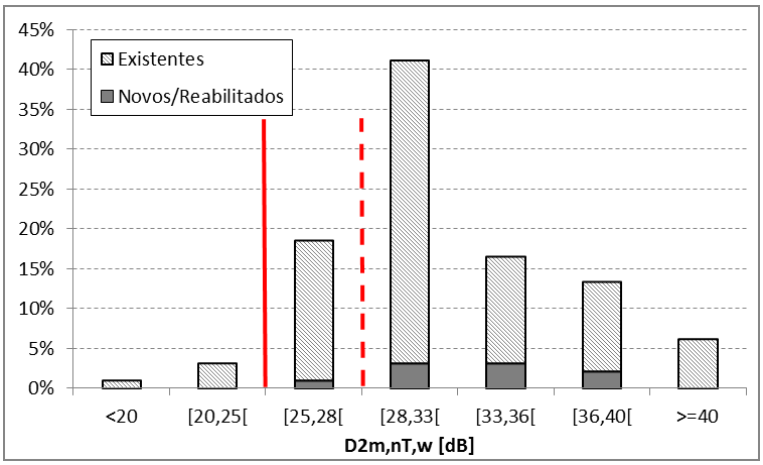



Figura 4 – Valores de $D_{2m,nT,w}$ obtidos nos ensaios efectuados em edifícios comerciais

Verifica-se que nesta amostra o valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas é relativamente baixo com um valor médio de 31,5dB e uma mediana de 31dB, tendo um desvio padrão de 4,92dB.

O não cumprimento do requisito do RRAE ocorre em 4% dos ensaios realizados. No entanto, caso a legislação não permitisse o acréscimo da incerteza, a percentagem de incumprimento seria de 23%, o que corresponderia a um aumento de aproximadamente 6 vezes.

Estes resultados também resultam do facto de que a grande maioria dos ensaios terem sido realizados em edifícios existentes, os quais dispõem de caixilharias antigas de vidro simples e com grandes permeabilidades. Para além desta situação, uma parte significativa dos espaços avaliados dispunham de dispositivos de exaustão para o exterior sem qualquer protecção acústica.

Nos edifícios novos avaliados, observa-se que os valores obtidos para o parâmetro $D_{2m,nT,w}$ são, na sua maioria, significativamente superiores ao limite regulamentar.

### 3.3 Edifícios de Escritórios

O gráfico da Figura seguinte apresenta a distribuição dos resultados do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, corrigido com o termo C ou $C_{tr}$ e acrescido do valor da incerteza (I = 3dB), indicado no RRAE.

Diferenciam-se edifícios novos ou reabilitados e edifícios existentes (edifícios que foram construídos e/ou projectados antes de 2002).

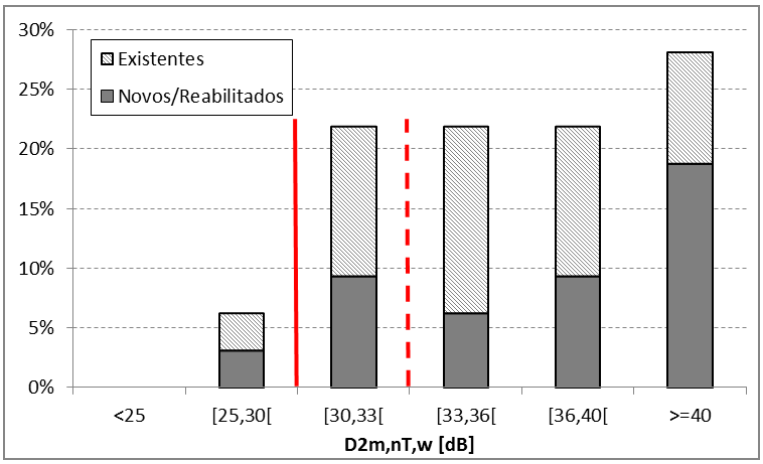



Figura 5 – Valores de $D_{2m,nT,w}$ obtidos nos ensaios efectuados em edifícios de escritórios

A análise do gráfico anterior revela uma predominância de edifícios existentes relativamente aos edifícios novos. Nesta tipologia não se verifica uma tendência em relação aos valores obtidos para $D_{2m,nT,w}$, relativamente ao edifício em avaliação ser novo ou existente.

Obteve-se, para estes ensaios, um valor médio do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas de 35,8dB, uma mediana de 35,5dB e um desvio padrão de 4,94dB.

O não cumprimento do requisito do RRAE ocorre em 6% dos ensaios realizados. No entanto, caso a legislação não permitisse o acréscimo da incerteza, a percentagem de incumprimento seria de 28%, o que corresponderia a um aumento de aproximadamente 5 vezes.

## 4. CONCLUSÕES

Verifica-se que os valores médios e de mediana do índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas, $D_{2m,nT,w}$, são significativamente superiores aos valores regulamentares, em aproximadamente 6dB.

Registou-se que, tendencialmente, os edifícios existentes têm um desempenho inferior aos novos ou reabilitados. Tal é devido ao facto de as soluções construtivas, nomeadamente em termos de caixilharia, não terem um desempenho acústico favorável, sendo na sua maioria constituídas por vidro simples.

Nos ensaios realizados, verificou-se que o acréscimo do valor regulamentar da incerteza, 3dB, ao valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons aéreos em fachadas conforme estabelecido na norma NP EN ISO 717-1:2013, permite a verificação daquele requisito acústico em cerca de mais 20% dos casos.

## 5. REFERÊNCIAS

[1] Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

[2] NP EN ISO 140-5:2009 – Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção: Parte 5 – Medição *in situ* do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e de elementos de fachada

[3] NP EN ISO 717-1:2013 – Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção: Parte 1 – Isolamento sonoro a sons de condução aérea

[4] NP EN ISO 3382-2:2011 – Acústica. Medição de parâmetros de acústica de salas: Parte 2 – Tempo de reverberação em salas correntes

[5] LNEC; *Regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios – Avaliação acústica / Critérios de amostragem;* Lisboa; 2012

[6] Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro – Regulamento Geral do Ruído

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# USO DE TÉCNICAS DE MEDIDA DE NIVEL DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN Y SOLIDNOISE™ EN LA EVALUACIÓN DE CÁMARAS ACÚSTICAS DE TRANSMISIÓN SONORA

PACS: 43.55 Rg

Romero Fernández, Amelia[1]; San Millán-Castillo, Roberto[2]; Domingo Bets, Salvador[3]; Casla Herguedas, Belén[4]; Frutos Vázquez, Borja[5]; Olaya Adán, Manuel[6]; Pavón García, Ignacio[7].
[1, 4, 5, 6] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja - CSIC
C/ Serrano Galvache 4. 28033 Madrid. España. Teléfono: +34 91 302 04 40
E-mail: [1]aromero@ietcc.csic.es; [4]belench@ietcc.csic.es; [5]borjafv@ietcc.csic.es; [6]olaya@ietcc.csic.es.
[2] E.T.S.I. Telecomunicación – Universidad Rey Juan Carlos
28943 Fuenlabrada (Madrid). España
E-mail: roberto.sanmillan@urjc.es
[3] Bluenoise, S.L.
C/ Joanot Martorell, 7-2. 46470 Catarroja (Valencia). España
E-mail: hal@noiselab.net
[7] Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Crta. de Valencia Km-7. 28031 Madrid. España
E-mail: Ignacio.pavon@upm.es

## ABSTRACT

To know the limits and performance of transmission suites (CEA) transmission flanks measurements are required, among others. At the Institute of Construction Science Eduardo Torroja, acoustic chambers are used as a testing scene for a new engineering tool called SolidNoise™, with which flanking sound transmission and flanking paths contribution of the different faces have been estimated.

This paper shows the study made in this test environment and the results of CEA characterization that will allow to improve them and to take advantage of their working range.

## RESUMEN

Para conocer los límites y las prestaciones de las cámaras de transmisión sonora (CEA) se requiere, entre otras, pruebas de evaluación de la transmisión por flancos. En el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se han usado las cámaras acústicas como campo de pruebas para una nueva herramienta de ingeniería llamada SolidNoise™, con la que se ha podido estimar la transmisión por flancos, y la contribución de las vías de transmisión de los diferentes paramentos.

En esta comunicación se presenta el estudio realizado en este entorno de pruebas y los resultados obtenidos de caracterización de las cámaras que permitirán optimizarlas y explotar sus posibilidades de trabajo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La transmisión del ruido posee dos mecanismos diferenciados en relación al medio de propagación de la onda acústica, la vía área y la vía estructural (directas e indirectas o por flancos) y existen muchos estudios para su cuantificación [1], [2] y un modelo de cálculo normalizado [3] en el que se basa nuestra reglamentación acústica [4]. Los estudios en el ámbito de la acústica arquitectónica, enfocados en resolver el problema del aislamiento acústico in situ entre recintos, deben tener en cuenta estos conceptos físicos de generación y transmisión sonora para poder abordar la problemática del ruido con soluciones que garanticen un aislamiento acústico óptimo. Por ello, debe estudiarse, no sólo la vía de transmisión principal a través del paramento que separa ambos recintos, sino la contribución del resto de paramentos y/o elementos constructivos que, en contacto con él, pueden tener mayor o menor influencia en el aislamiento final conseguido.

En el laboratorio de acústica del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja se vienen realizando estudios sobre los mecanismos y fenómenos de propagación de ondas, en el ámbito de la acústica de la edificación, atendiendo especialmente al *interface* sólido-gas. Dentro de este contexto se enmarca este trabajo en el que se ha querido probar una nueva herramienta de ingeniería para la evaluación de la transmisión por flancos a partir de la medida de la velocidad de vibración sobre las superficies que conforman los recintos (existe un procedimiento estandarizado en laboratorio en relación a estas medidas de vibración [5]). La teoría de la transmisión por flancos ha sido ampliamente estudiada, tanto en laboratorio como in situ, y mediante técnicas diferentes [6]. La relación entre la velocidad de vibración del contorno que confina el espacio, y el ruido radiado por dichas superficies, constituye un campo de indudable interés en el contexto de este estudio [7].

En este sentido se ha iniciado este trabajo de investigación mediante el uso de la herramienta de ingeniería SolidNoise™ con el objeto de estudiar los mecanismos de propagación del ruido entre dos recintos de características conocidas (cámaras de transmisión acústica, CEA) y con la intención de, por un lado conocer las posibilidades de esta tecnología y avanzar en su validación y calibración en un entorno de ensayo conocido, y por otra parte, estudiar la caracterización de las cámaras de transmisión horizontal en relación al aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones verticales. La metodología SolidNoise™ se basa en caracterizar el ruido aéreo de un recinto mediante la medida de las vibraciones en el contorno sólido del mismo y conocer el balance energético aportado por cada una de las superficies que lo encierran; estimando de esta forma cómo contribuye cada una de las superficies que delimitan el recinto al nivel de ruido de recepción.

El objetivo de esta comunicación es presentar, a modo de avance, los resultados de esta primera fase del proceso de caracterización de los recintos de ensayo mencionados, que serán objeto de una segunda fase de validación y acotación del método de evaluación que podrán ser publicados posteriormente. Los resultados obtenidos orientan a tener en cuenta el sistema y la metodología en aplicaciones de acústica arquitectónica de gran interés como es la búsqueda de puntos débiles en cerramientos, el estudio de patologías, y la optimización en el uso de sistemas de rehabilitación en donde es fundamental tener en cuenta las vías de transmisión indirecta, valorando la conveniencia de actuar o no sobre determinados flancos y en qué medida debe hacerse.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE ENSAYO

Las mediciones se realizaron en las cámaras acústicas de transmisión del Laboratorio de Acústica del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. En la Figura 1 se muestra un esquema de dichas cámaras.

Estás cámaras están normalizadas para el ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo, configurándose como dos espacios de planta rectangular separados por una abertura de 10 $m^2$ para la instalación de la muestra de ensayo. La configuración constructiva atiende a la estructura box-in-box, con ambos recintos desolidarizados mediante distintos sistemas elásticos y con superficies rígidas en la cámara de emisión, y flexibles en la de recepción con el objeto de controlar el tiempo de reverberación.

Las puertas de acceso a las cámaras son de aluminio con aislamiento interno y juntas de sellado por presión en la carpintería.

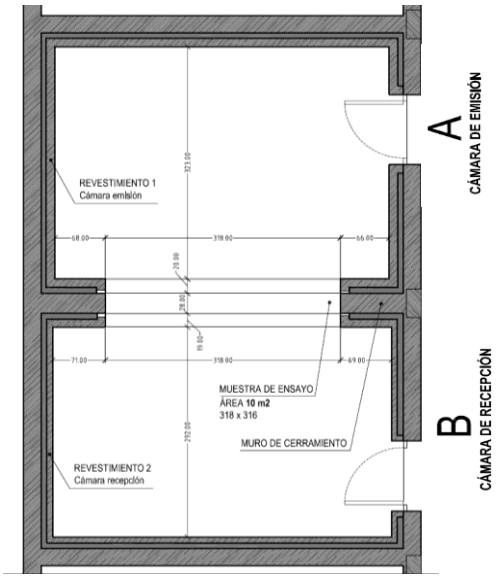



Figura 1 - Esquema en planta de las cámaras de transmisión

La muestra que se construyó para la realización de este trabajo experimental fue:
MA (25mm) + LP (115mm) + M (3mm)

- MA (25 mm): Revestimiento de mortero con árido de 25 mm de espesor;
- LP (115mm): Pared de ladrillo perforado de ½ pie de espesor;
- M (3 mm): Revestimiento con mortero de cemento de 3 mm de espesor;

Espesor de la muestra: 14,3 cm
Masa por unidad de superficie: m = 185,3 kg/$m^2$

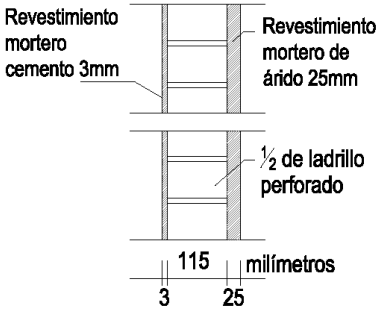



Figura 2 - Muestra de ensayo

## 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El objetivo fundamental de la fase experimental son las mediciones de nivel de velocidad de vibración. La adquisición de dicho parámetro es parte integrante de la metodología de cálculo integrada en el método SolidNoise™.

SolidNoise™ es un método matricial para la ingeniería de aislamiento acústico [8]. Se basa en la estimación del nivel de recepción en un recinto teniendo en cuenta la contribución de cada una de las superficies límite del mismo. Esa contribución se consigue a través del conocimiento del nivel de velocidad de vibración, la superficie de los paramentos tenidos en cuenta, la unión entre ellos, y los datos obtenidos a través de un ensayo convencional de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales [9].

La primera parte del procedimiento de medida consiste en la medición del nivel de velocidad en la sala receptora (B) de la CEA de transmisiones. Durante las mediciones se requiere que haya una excitación en la sala emisora (A) de la misma CEA. Tal excitación será un campo sonoro difuso generado en la sala emisora con señal de ruido rosa filtrado. Este mismo procedimiento

se volverá a repetir intercambiando las salas: en la sala receptora (B) se generará el campo sonoro difuso excitador, mientras que en la sala emisora (A) se realizarán las mediciones de nivel de velocidad.

La adquisición de datos se realiza con un analizador en frecuencia, y una sonda de vibraciones diseñada para la ejecución de esta metodología [10].




Figura 3 - Sonda SolidNoise$^{TM}$ para la ejecución de las mediciones de nivel de velocidad de vibración.

De cara a obtener información detallada para este estudio, y futuros desarrollos del mismo, se opta por realizar un muestreo amplio en todas las superficies de la CEA. La idea es buscar distribuciones homogéneas de comportamiento de vibración por lo que se discretizan las zonas, distinguiéndose un total de 20 superficies que se indican a continuación:

- **Paredes laterales (A, B y C):** 3Uds. para la sala receptora y 3Uds. para la sala emisora;
- **Pared D:** 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora. Pared continuación del hueco porta-muestras;
- **Interior pared muestra:** se trata del perfil de la pared (Pared D) que enlaza con el porta-muestras, y que es visible y accesible. 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.
- **Marco:** se trata de la superficie visible y accesible del porta-muestras. 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.
- **Muestra:** es el espécimen de ensayo que se encontraba instalado en el marco porta-muestras común a la sala receptora y la sala emisora de la CEA. Se consideran las caras que dan a una y otra sala, así: 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.
- **Techo:** 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.
- **Suelo:** 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.
- **Puerta:** 1Ud. para la sala receptora y 1Ud. para la sala emisora.

En cada una de las superficies se realiza un muestreo “ad hoc” en función de su tamaño y su situación respecto a las demás. Por regla general el muestreo es más amplio en las superficies grandes, y va disminuyendo según lo hace la superficie de los paramentos. En la Figura 4 se presenta un ejemplo ilustrativo de un esquema de muestreo en la CEA, así como la distribución de los puntos de medida sobre cada una de las superficies.

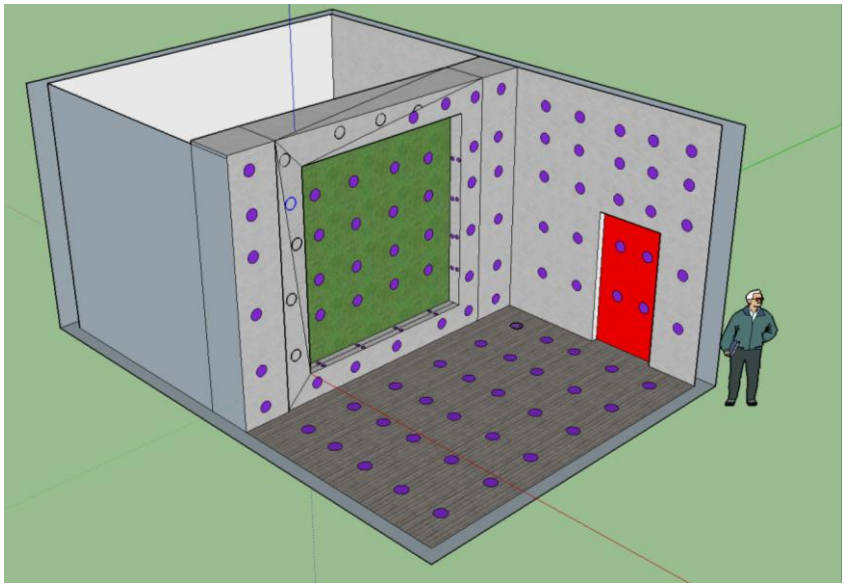


Figura 4 - Esquema de la sala receptora de la CEA, incluyendo algunos puntos de medida de vibración en cada una de las superficies límite consideradas (puntos sobre la superficie)

Se realizaron medidas de vibración de fondo, en cada uno de los paramentos que conforman la CEA para comprobar la validez de las mediciones en la presencia de excitación.

La configuración del analizador fue la siguiente: FFT, 1601 líneas, rango de frecuencias hasta 5 kHz y tiempo de medida 6 segundos por muestra. Se trata de obtener una base de datos experimentales de detalle, aunque para simplificar explicaciones posteriores, los resultados se presentan en bandas de 1/3 de octava.

El equipamiento empleado se enumera a continuación. Todos sus elementos se clasifican como de precisión y su uso está extendido en el ámbito profesional:

- Fuente sonora, modelo 4224, de la firma Brüel & Kjaer.
- Analizador en frecuencia, modelo SVAN977, de la firma Svantek.
- Sonda SolidNoise™, de la firma Bluenoise.
- Micrófono, modelo ACO7052E, de la firma Svantek.
- Preamplificador de micrófono, modelo SV12L IEPE, de la firma Svantek.
- Programa de tratamiento de datos, modelo Noiselab™, de la firma Bluenoise.

Además, como segunda parte del procedimiento de medida, se realizaron dos ensayos convencionales de aislamiento a ruido aéreo entre recintos [9]. Para realizar estos ensayos se reutilizó el equipamiento descrito simplemente cambiando la configuración del equipo para convertirlo en un analizador de señal acústica, y sustituyendo la sonda de vibraciones por un micrófono.

El número de registros que se manejó para la obtención de todos los resultados es de 412 teniendo en cuenta: niveles de vibración, vibración de fondo, medidas de ajuste interno, y mediciones de aislamiento a ruido aéreo in situ.

## 4. RESULTADOS

El parámetro que se ha procesado y estudiado es la diferencia de niveles estandarizada ($D_{nT}$) en el rango de frecuencias de 100 a 5000 Hz [4].

El ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo mediante la metodología convencional y su procesado mediante el programa de procesado de datos de SolidNoise™ (Noiselab) ha dado los resultados siguientes, tanto en espectro (Figura 5) como en resultados globales (Tabla 1):

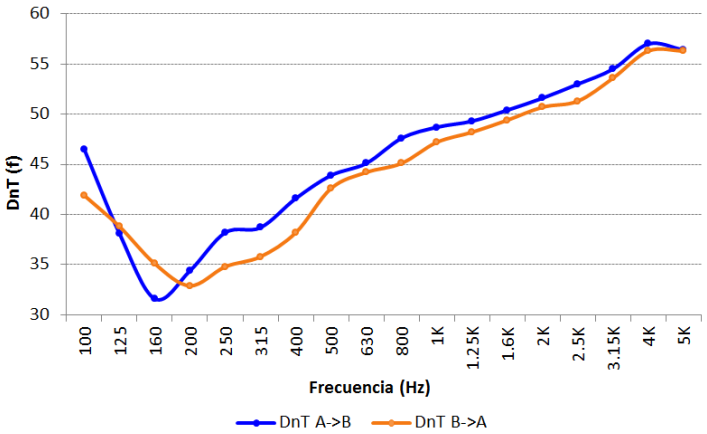



Figura 5 - Espectro en 1/3 de octava de aislamiento acústico en ambos sentidos de medición

| | **Sentido A->B** | **Sentido B->A** |
|---|---|---|
| **$D_{nT,w}$(C ; Ctr) (dB)** | 47 (0;-4) | 46 (0;-4) |
| **$D_{nT,A}$ (dBA)** | 46,9 | 45,3 |

Tabla 1 –Resultados globales de aislamiento acústico

Mediante el método de evaluación SolidNoise™ objeto de estudio, a través del procesado de los resultados de la velocidad de vibración captada en las diferentes superficies, podemos analizar la contribución al aislamiento final de cada vía de transmisión; bien cada una de ellas individualmente o agrupadas según la tipología de partición (por ejemplo, paredes), según patrones de vibración similares, etc. y según el interés del análisis.

Estos resultados se pueden obtener tanto gráfica (Figura 6) como numéricamente, para todas las bandas de 1/3 de octava del rango de frecuencias de interés.

La figura siguiente muestra las curvas de aislamiento de las distintas vías de transmisión agrupadas. Se ha considerado que, desde el punto de vista del análisis, las agrupaciones de interés son las siguientes:

- Muestra;
- Paredes (Paredes laterales A + B + C);
- Pared muestra (Pared D);
- Marco (Interior pared muestra + Marco);
- Suelo;
- Techo;
- Puerta.

Con trazo más grueso se muestra la curva de aislamiento global.

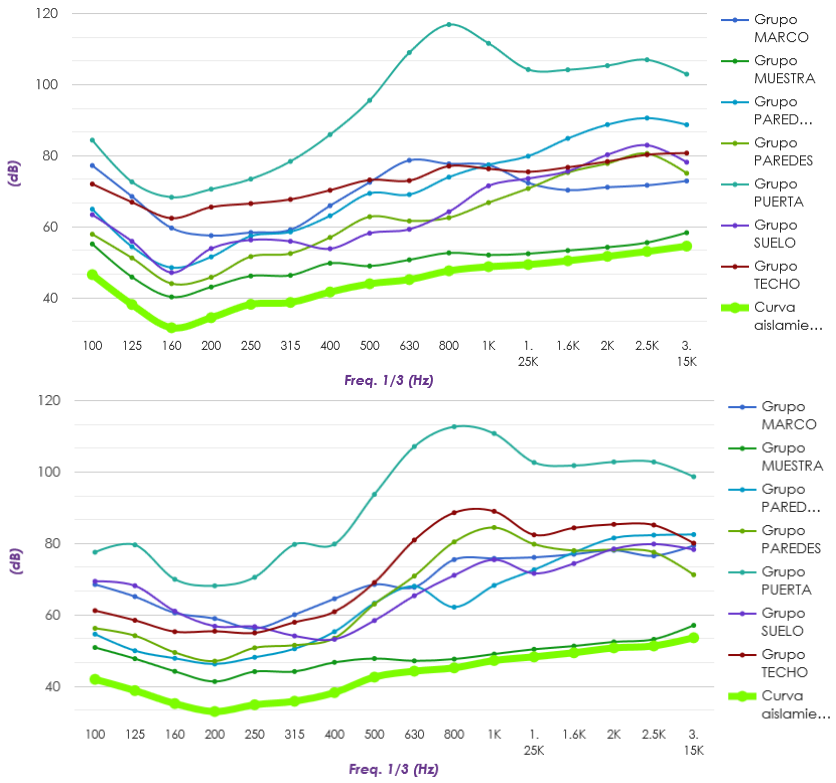



Figura 6 – Contribución al aislamiento de las distintas vía de transmisión agrupadas, en ambos sentidos de medición. Arriba A->B. Abajo B->A

A la vista de las curvas mostradas se puede apreciar cómo la curva de aislamiento global viene condicionada por la curva de aislamiento de la muestra, especialmente a partir del tercio de octava de 630 Hz donde prácticamente se superponen. Es en más baja frecuencia donde se aprecia cierta influencia de la transmisión por vía de otros elementos constructivos.

Como es lógico, la transmisión a través de muestra es siempre la transmisión dominante; sin embargo, mediante el uso de esta metodología vemos qué transmisiones secundarias serían las siguientes en orden de importancia: la pared D y el suelo. Por otra parte, los elementos que menos transmiten son el marco porta-muestras y las puertas (Figura 7a).

Estos datos también pueden analizarse desde el punto de vista porcentual de la contribución individual de cada elemento (o de cada grupo), tanto en espectro para cada uno de los elementos como todos y cada uno de los elementos se comportan en una determinada frecuencia (Figura 7b)

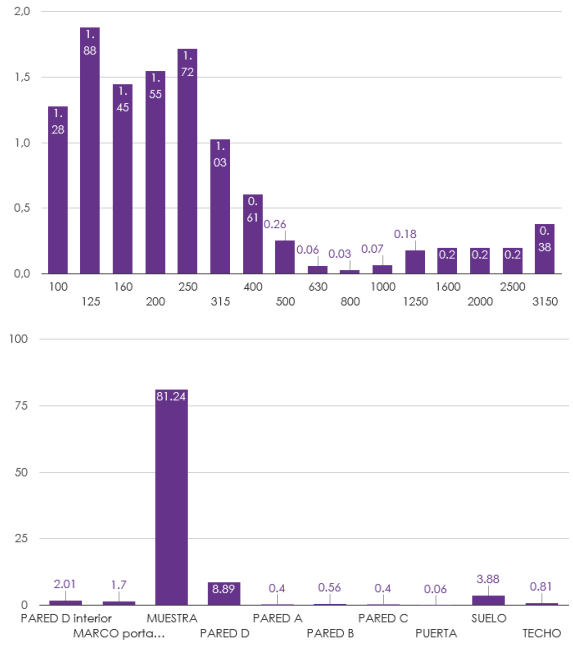



Figura 7 – 7a) Transmisión acústica de la puerta en sentido A->B para todo el espectro. 7b) Transmisión acústica de cada elemento estudiado en el 1/3 de octava de 1 kHz en sentido B->A

Por último, existe un módulo llamado *Noise Mapper* que realiza una representación gráfica en forma de mapa con interpolación, de las mediciones de nivel de velocidad de vibración en cada una de las superficies límite. De esta forma, nos permite "visualizar" el comportamiento de las transmisiones acústicas por las diferentes superficies y elementos estudiados mediante una graduación de colores de los niveles de vibración superpuestos a fotografías reales del entorno del ensayo.

En el ejemplo siguiente (Figura 8) se muestra para el 1/3 de octava de 125 Hz cómo es la transmisión del ruido en la cámara receptora en la muestra, marco, pared D interior, pared D, pared C, puerta y suelo. Para ello previamente se han definido las superficies de estudio de interés, un mallado de puntos en cada una de ellas y se les ha asignado las mediciones de vibración correspondientes.




Figura 8 – *Noise Mapping* para el tercio de octava de 125Hz

## 5. CONCLUSIONES

La transmisión por vía de flancos es un tema muy importante en la acústica de la edificación; los recintos reales tienen radiación del sonido a través de muchos caminos de transmisión y es muy importante que contemos con procedimientos y herramientas, que sean fácilmente trasladables a situaciones in situ, para la medida y evaluación de los caminos de flanco.

En este trabajo se ha realizado un primer acercamiento al sistema de medida SolidNoise™ que evalúa el aislamiento acústico in situ mediante el estudio individualizado de cada paramento que conforma los recintos y su contribución al resultado final. En entorno de ensayo ha sido unas cámaras de transmisión acústica. Adicionalmente al ensayo convencional de aislamiento acústico, se han realizado mediciones de velocidad de vibración en cada una de las superficies de ambos recintos emisor y receptor mediante la sonda de vibraciones.

En el caso de estudio, la herramienta ha mostrado los caminos de transmisión secundarios y sus porcentajes. Si bien estos caminos que existen no son en ningún caso dominantes, sí nos orientan en determinadas actuaciones de mejora que se podrían acometer, previendo una segunda fase de trabajo que nos sirva además para estudiar la validación de la herramienta.

A falta de profundizar en el uso, funcionamiento, aplicabilidad y validación de este sistema de medida, lo que hemos podido constatar es su interés para profundizar en el conocimiento de la transmisión estructural por flancos a la hora de resolver problemas de aislamiento acústico in situ. Por otra parte, y desde un punto de vista más práctico y aplicado, no cabe duda del interés de usar esta tecnología para la detección de patologías acústicas y en los proyectos de rehabilitación acústica, de forma que conozcamos, de manera más precisa, la conveniencia de actuar sobre el elemento separador o sobre los elementos de flanco, sobre cuál/cuáles y en qué medida, encaminando el proyecto acústico de rehabilitación hacia soluciones más eficaces.

## 6. REFERENCIAS

[1] Gerretsen, E., “Calculation of sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures”, Applied Acoustics 12 (1979) 413-433.

[2] Craik, R.J.M., “The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings”, Applied Acoustics 62 (2001) 29-46.

[3] UNE EN 12354. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

[4] DB HR Documento básico de Protección frente al ruido. Septiembre 2009. Código Técnico de la Edificación.

[5] UNE-EN ISO 10848-1. Acústica. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 1: Documento marco (2007).

[6] Andrade, C.A.R., Barbaresi, L., Fausti, P. & Semprini, G., “Comparison between measurement techniques to estimate flanking sound transmission”, IV Congreso FIA 2004, Guimarães, Portugal

[7] Cremer, L. and Heckl, M. “Structure-borne sound. Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies”, Springer-Verlag (1973)

[8] Aniorte Pérez, José Antonio y Domingo Bets, Salvador. “Método matricial para la ingeniería de aislamiento acústico”. 41º Congreso nacional de Acústica, Tecniacústica León - 2010.

[9] UNE-EN ISO 16283. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico de los edificios y en los elementos de la construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

[10] San Millán-Castillo, Roberto; Domingo, Salvador; Pavón, Ignacio. “Evolución de una sonda de vibraciones para simplificar la evolución de la transmisión sonora por flancos entre recintos”. 46º Congreso nacional de Acústica, Tecniacústica

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# EVOLUCIÓN DE UNA SONDA DE VIBRACIONES PARA SIMPLIFICAR LA EVALUACIÓN DE TRANSMISIÓN SONORA POR FLANCOS ENTRE RECINTOS

PACS: 43.55.Rg

San Millán-Castillo, Roberto[1];Domingo, Salvador[2] ;Pavón García, Ignacio[3]
[1] E.T.S.I. Telecomunicación – Universidad Rey Juan Carlos, Camino del Molino, s/n - 28943 Fuenlabrada (Madrid, España).
E-mail: roberto.sanmillan@urjc.es
[2] Bluenoise, S.L. C/ Joanot Martorell, 7-2 46470 Catarroja (Valencia, España).
E-mail: hal@noiselab.net
3 Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada-Universidad Politécnica de Madrid (UPM) Crta. de Valencia Km-7 28031 (Madrid, España).
E-mail: ignacio.pavon@upm.es

## ABSTRACT

To know vibration velocity level on a room surface is important in order to get information about flanking sound transmission between rooms. Instrumentation market offers a large amount of solutions, when it comes to sensors. When talking about accelerometers mounting techniques, the answer is less obvious. A probe evolution designed to perform this kind of measurements is shown. It is prioritized a solution that lets one a fast, comfortable, and barely intrusive data acquisition. Several probe versions and prototypes are described and compared through measurements in a real environment.

## RESUMEN

Conocer el nivel de velocidad de vibración en las superficies de un recinto es relevante para obtener información sobre la transmisión sonora por flancos entre recintos. El mercado de la instrumentación ofrece una amplia variedad de soluciones en cuanto a sensores. Cuando se trata la técnica de montaje del acelerómetro, la respuesta es menos obvia. Se presenta la evolución de una sonda diseñada para ejecutar estas mediciones. Se prioriza una solución que permita una adquisición de datos rápida, cómoda y apenas intrusiva. Varios prototipos y/o versiones se describen y comparan mediante mediciones en un entorno real.

## INTRODUCCIÓN

La determinación del nivel de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos se realiza a partir de procedimientos descritos en estándares internacionales de uso generalizado en esta disciplina [1]. En términos prácticos se trata de determinar el aislamiento “in situ” del elemento separador de 2 recintos.

Los resultados están destinados a la certificación del valor de aislamiento entre locales, al objeto de compararlos con los valores definidos en la legislación aplicable en cada caso [2].

Hay muchos trabajos que finalizan en esa declaración de conformidad, pero otros muchos requieren implementar un diseño que normalmente incrementa el aislamiento del elemento existente. En ese momento la información que ofrece este tipo de ensayos podría ser insuficiente.

A menos que la situación sea equiparable a la de una cámara de transmisiones sonoras, es probable que las contribuciones al nivel de recepción provengan de más paramentos que el que divide las dos salas estudiadas; es decir, de las transmisiones por flancos. Por tanto, habrá que tener en cuenta ese aporte en la concepción de un diseño de aislamiento acústico. De otra forma, podríamos errar en la selección de soluciones de control y su envergadura, así como el lugar en las que aplicarlas [3], [4].

Una de las variables relevantes para definir las transmisiones indirectas es el nivel de velocidad de vibración [5], [6], [7]. Se trata de una variable representativa de la potencia acústica radiada por una pared, o elemento de ella, y su adquisición es relativamente sencilla.

Se necesita instrumentación y métodos que nos faciliten datos para estimar la contribución de las transmisiones por flancos en las condiciones de un ensayo de aislamiento “in situ”. El equipamiento generalista existente es capaz de satisfacer las necesidades fundamentales de adquisición, y análisis de variables que nos dan información sobre la contribución de los flancos. Sin embargo, optimizar su uso para esta aplicación concreta requiere la integración de varios componentes de ámbito general y su adaptación a la operativa de estos ensayos.

Esta comunicación transmite el proceso de evolución de una sonda de vibraciones diseñada para simplificar la obtención de datos relativos a las transmisiones indirectas en un recinto.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen numerosos métodos e instrumentación que nos podrían proporcionar datos sobre la contribución de los flancos de un recinto al aislamiento acústico, los más relevantes son los siguientes:

1. Bloqueo de paramentos: se trata de dotar de un aislamiento muy superior a cada uno de los flancos implicados y determinar su contribución al nivel de recepción [1], [8].
2. Intensidad acústica p-p: obtención de la potencia sonora “in situ” generada por cada una de las superficies a través de la medida con una sonda clásica p-p [9].
3. Intensidad acústica p-u: similar al punto 2), empleando una sonda p-u [10].
4. Vibrometría láser: medida de los niveles de velocidad de vibración a través de interferometría láser [11], y posterior inferencia de la potencia radiada por cada una de la superficie.
5. Vibrometría clásica: similar al punto 4), empleando el acelerómetro como sensor de medida [4], [12].

Todas las propuestas planteadas son perfectamente válidas desde el punto de vista teórico, tal y como avalan las referencias asociadas. Sin embargo, centrándose en su aplicación práctica y en la ejecución en un ensayo en un entorno real, los condicionantes no son equiparables.

El objetivo principal de esta nueva propuesta es el de simplificar la evaluación de la transmisión por flancos. Para ello, se prioriza una metodología cuya adquisición de datos sea rápida, cómoda y lo menos intrusiva posible. De esta forma, su uso será de aplicación en la mayoría de casos reales y no quedará en un mero ejercicio de laboratorio. La idea es que con poco más equipamiento que el utilizado en un ensayo clásico de aislamiento acústico, sea factible obtener datos relevantes sobre la transmisión por flancos.

Analizar las propuestas de métodos e instrumentación posibles es fundamental. Bloquear cada uno de los paramentos es la solución ideal, sin embargo es utópica en los casos reales: por recursos económicos y temporales, así como de molestia para el usuario. Los métodos de

intensidad, ofrecen mucha información sobre la radiación sonora de las superficies de forma exhaustiva, pero su aplicación hace uso de instrumentación con un coste medio-alto, de personal muy cualificado, y de más medios y métodos precisos para generar datos correctos; en situaciones habituales con mobiliario su ejecución puede complicarse ostensiblemente. En el caso de la vibrometría láser, las implicaciones son similares al caso de la intensidad, pero con un coste de equipamiento en la gama alta, aunque la adquisición de datos es más fácilmente automatizable.

## SOLUCIÓN PROPUESTA Y EVOLUCIÓN DE LA MISMA

De cara al cumplimiento del objetivo planteado, la medida de vibraciones clásica es la que mejor puede ajustarse en un ensayo de estas características. Las razones son las siguientes:

- Uso de sensores genéricos compatibles con la mayoría de analizadores empleados en el ensayo de aislamiento acústico.
- Coste contenido de la ampliación de equipamiento: acelerómetro mono-axial genérico y cableado sencillo.
- Acceso rápido y sencillo a cada una de las superficies límites para medir las vibraciones. Ejecución de medidas directa e inmediata.

A pesar de no medir radiación sonora directamente, su correlación con ella es de utilidad para la evaluación de las transmisiones indirectas [4], [12]. Dentro de esta técnica, encontramos multitud de posibilidades. Nos centraremos en: el sensor y técnica de montaje.

Con una aproximación muy simplificada, es posible definir la relación entre el nivel de vibración para ondas de flexión de una pared y radiación sonora, mediante la siguiente ecuación:

$$W_{radiada} = S\rho_0 c_0 \sigma \langle v^2 \rangle \quad (1)$$

La magnitud de medida de interés es el nivel de velocidad de vibración *rms* promediado temporal y espacialmente, en el eje perpendicular a la pared, que es la componente que más relevancia tiene en la determinación de la energía sonora radiada por una superficie [5], [13], [14]. La eficiencia de radiación ($\sigma$) podrá ser estimada en función de la composición de las superficies.

El sensor más cómodo para realizar medidas in situ es un acelerómetro piezoeléctrico con inyección de corriente. En acústica arquitectónica las temperaturas no son extremas, y no hay razón para el empleo de acelerómetros capacitivos. De esta forma se elimina de la cadena de medida cualquier amplificador de carga, y se puede emplear cable coaxial genérico y de coste bajo para la realización de las mediciones.

Se debe seleccionar un sensor que satisfaga nuestras necesidades de análisis. Por un lado debemos obtener datos desde 50Hz hasta 5000Hz, que es en rango de interés en medidas de aislamiento. Por otro, la sensibilidad del acelerómetro marcará el rango dinámico de medida de las oscilaciones de la pared. A pesar de no esperar desplazamiento amplios como en otras aplicaciones, sí se debe tener capacidad para medir vibraciones de muy bajo nivel, por lo que se requiere una sensibilidad alta y un nivel de ruido de fondo bajo. Un peso reducido respecto a un elemento constructivo típico, es algo a contemplar. En conclusión: un sensor de precisión.
Se selecciona un acelerómetro piezoeléctrico ®ICP mono-axial con una sensibilidad de 100*mV/g*, rango de medida desde los 0.01 $ms^{-2}rms$, frecuencia de resonancia en 25*kHz*, y un peso de 40*gr*.

Hasta este punto se ha conseguido una solución en una gama de coste bajo, ligero, de pequeño tamaño, y compatible con un alto porcentaje de cadenas de medida dedicadas al aislamiento acústico. Para la consecución de una metodología rápida, cómoda y no intrusiva, hay que centrarse en la técnica de montaje del acelerómetro, pues será el factor más influyente.

Las posibilidades son variadas, y sus efectos están perfectamente descritos [15]. Sin embargo, las características particulares de la aplicación propuesta limita el uso de muchas de ellas. En un laboratorio es perfectamente posible emplear un montaje con anclaje rígido, que es el más conveniente. Ahora, tratar de reproducirlo en recintos reales convertiría el método en el más costoso y lento de todos los propuestos. Además, de esta forma se estaría lejos de disponer de una técnica poco intrusiva; más bien todo lo contario y se retrocedería en el objetivo inicial.

Se podría emplear cera para el montaje de los acelerómetros. Esta técnica es obviamente mucho menos intrusiva que la descrita anteriormente. Su ejecución se convierte en tediosa y poco repetible por la necesidad de reponer la cera constantemente durante el ensayo. En locales reales en uso, es complicado ir dejando residuos de cera en las paredes, que además son difíciles de retirar completamente en multitud de ocasiones [14].

Vistos todos estos argumentos, parece que la técnica que mejor se ajusta a los objetivos es el empleo de una sonda. Con el uso de la sonda se tiene acceso más rápido de todos lo posible a las superficies del recinto, y se trata de la manera menos intrusiva de adquirir datos. Bien es cierto que se debe contar con una limitación en la respuesta en frecuencia del acelerómetro, ya que la frecuencia de resonancia del sensor se verá disminuida de forma considerable.

Una vez se decide la línea de actuación en cuanto a la técnica de montaje, se reflexiona sobre la operatividad del ensayo y la mejor forma de llevarlo a cabo. Será necesario realizar un muestreo amplio en las paredes del recinto, resultando un número de mediciones considerable. Así la ejecución de la medida ha de ser lo más cómoda posible.

El uso directo del acelerómetro y la sonda conectada al mismo, será sólo válido para mediciones puntuales y poco exhaustivas. En este caso se debe garantizar cierta repetibilidad y comodidad en la realización de las mismas. Por ello se decidió actuar en este punto con diferentes diseños que mejorarán este punto:

**Modelo original:** se trata de un cilindro metálico con 64*mm* de diámetro y 57*mm* de longitud, que permite un agarre más estable del conjunto acelerómetro y sonda. En su interior se suspende el acelerómetro mediante muelles metálicos para permitir absorber pequeños cambios en el soporte de la sonda y evitar tensiones no deseadas del posicionamiento de la sonda sobre la pared; generadas por las irregularidades o materiales de las superficies, por la localización incómoda del punto de medida, o por la diferente fuerza aplicada por el ejecutor de la medida. La sonda se completa con una varilla metálica de 60*mm* de longitud que será la que conecte el acelerómetro con la superficie de interés. Ver *Figura 1 y Figura 2(1)*.

**Modelo evolucionado**: a partir del modelo anterior, y una vez realizados multitud de trabajos, se ve conveniente la necesidad de mejorar el diseño en la parte del agarre. Se dota a la sonda de una estructura mucho más ergonómica que redunda en una mayor comodidad a la hora de realizar las mediciones. El conjunto disminuye de tamaño, permitiendo el agarre completo con una mano. Además la suspensión del sensor se mejora mediante amortiguadores de silicona más rígidos que los anteriores, en hasta 4 puntos, mejorando la posición del acelerómetro en todo momento. Esta primera versión mejorada la se denomina “modelo evolucionado intermedio con menor ajuste de varilla”. Ver *Figura 1 y Figura 2(2)*.



Figura 1. A la izquierda, fotografía de la primera versión de sonda de vibraciones, “modelo original”.
A la derecha, fotografía de la versión de sonda de vibraciones actual. Con pequeñas modificaciones, se corresponde con todos los modelos que contengan en su descripción “modelo evolucionado”.

**Modelo evolucionado + varilla modificada**: se trata de una mejora del modelo evolucionado mediante la mejora del ajuste de la varilla al acelerómetro, convirtiéndolo en excelente; mucho más rígido y solidario con el sensor. El objeto de esta modificación es dotar a la sonda de una mayor estabilidad en la medida que redunde en una mayor repetibilidad de las mismas. En este caso se abren dos caminos: el primero, únicamente ejecutar el ajuste al acelerómetro (“modelo evolucionado + ajuste de varilla mejorado); y el segundo, añadir en el extremo de la sonda que entra en contacto con la pared con un disco metálico (diámetro 20*mm*, y espesor de 3*mm*), de cara a encontrar un contacto con la superficie mayor y más cómodo en la ejecución de las mediciones (“modelo evolucionado (3) + varilla modificada”*)*. Ver *Figura 1 y Figura 2(3, 4)*.

## EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En una primera fase, se realizan una serie de mediciones para comprobar el comportamiento de las distintas versiones de la misma. A pesar de existir algunas referencias al respecto [4], se enfrentan dichas mediciones con otras metodologías clásicas que proporcionan un mejor montaje, en la medida de las posibilidades disponibles: montaje con cera, y montaje con apoyo simple directo y manual del acelerómetro.

Las mediciones de nivel de velocidad se llevan a cabo en un aula de laboratorio de la Universidad Rey Juan Carlos. La excitación de las superficies se realiza mediante un campo sonoro difuso generado en una sala anexa, común para todos los experimentos llevados a cabo. El nivel de presión sonora promedio en la sala emisora es de 100dB, y el aislamiento de la solución es débil, con un $R_w$ de 17dB. Se adquieren los datos en diferentes puntos del paramento común de ambos recintos, descritos a continuación:

- Pared: elemento principal, pared doble de cartón yeso. 2 puntos (A y B).
- Puerta: elemento secundario, panel de madera. 2 puntos (C).
- Cristal: elemento secundario, integrado en la puerta. 1 punto (D).

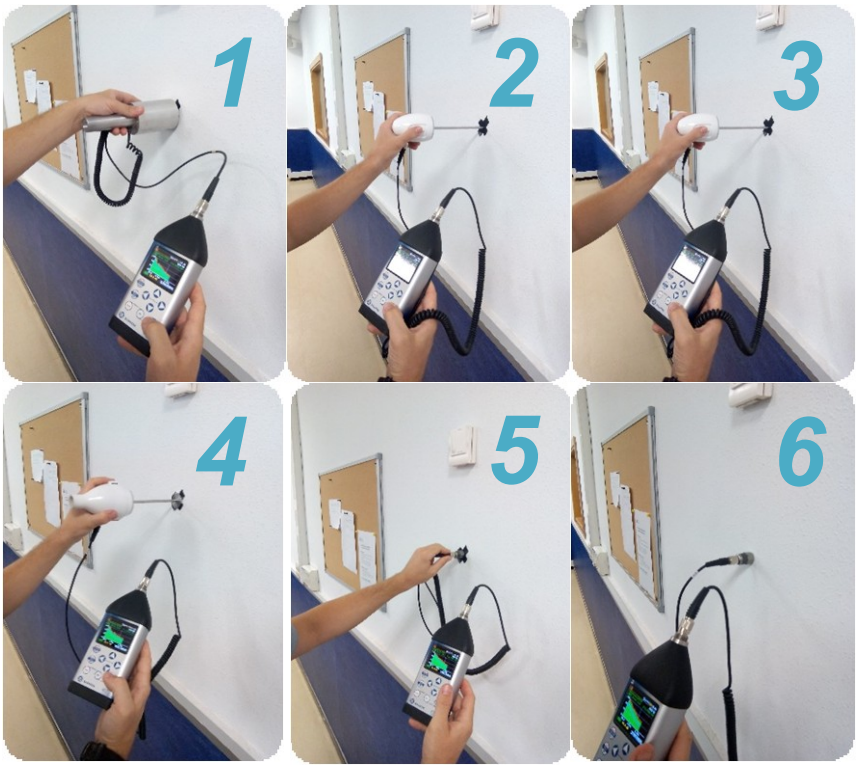



Figura 2. Fotografía de la ejecución de mediciones con distintos modelos de sonda y acelerómetro llevados a cabo:1) modelo original, 2) modelo evolucionado intermedio, con menor ajuste de varilla, 3) modelo evolucionado (2) + ajuste de varilla mejorado, 4) modelo evolucionado (3) + varilla modificada, 5) acelerómetro con apoyo simple, 6) acelerómetro con cera.

Se seleccionan diferentes materiales para tratar de obtener la incidencia de cambios en este aspecto. Además, re realizan 3 mediciones consecutivas en cada uno de los puntos, tanto para ruido de fondo como durante la excitación con campo acústico, de cara a tener una primera impresión sobre la repetibilidad de las mediciones según el material y el tipo de sonda. Se mantuvo el mismo operador.

Las mediciones se realizan con una configuración ambiciosa de cara a disponer de datos para éste y futuros trabajos de desarrollo: FFT, 1601 líneas, rango de frecuencias hasta 5kHz, tiempo de medida 6s. El número total de registros con el que trabajamos finalmente fue de 210, contabilizando las mediciones descritas, junto a otras de control interno del experimento.
El equipamiento empleado se enumera a continuación. Todos sus elementos se clasifican como de precisión y su uso está extendido en el ámbito profesional:

- Fuente sonora, modelo Qohm, de la firma Qsources.
- Amplificador de potencia, modelo Qam, de la firma Qsources.
- Analizador en frecuencia, modelo SVAN977B, de la firma Svantek.
- Acelerómetro, modelo SV 80, de la firma Svantek.

Los resultados de las mediciones realizadas se presentan a continuación.

En el caso del nivel de velocidad de la *Figura 3*, se observa como los métodos alejados de un montaje fijo infraestiman los valores de nivel. A excepción del primer prototipo de sonda que justamente produce el efecto contrario. Se ilustra con uno de los puntos de medida.

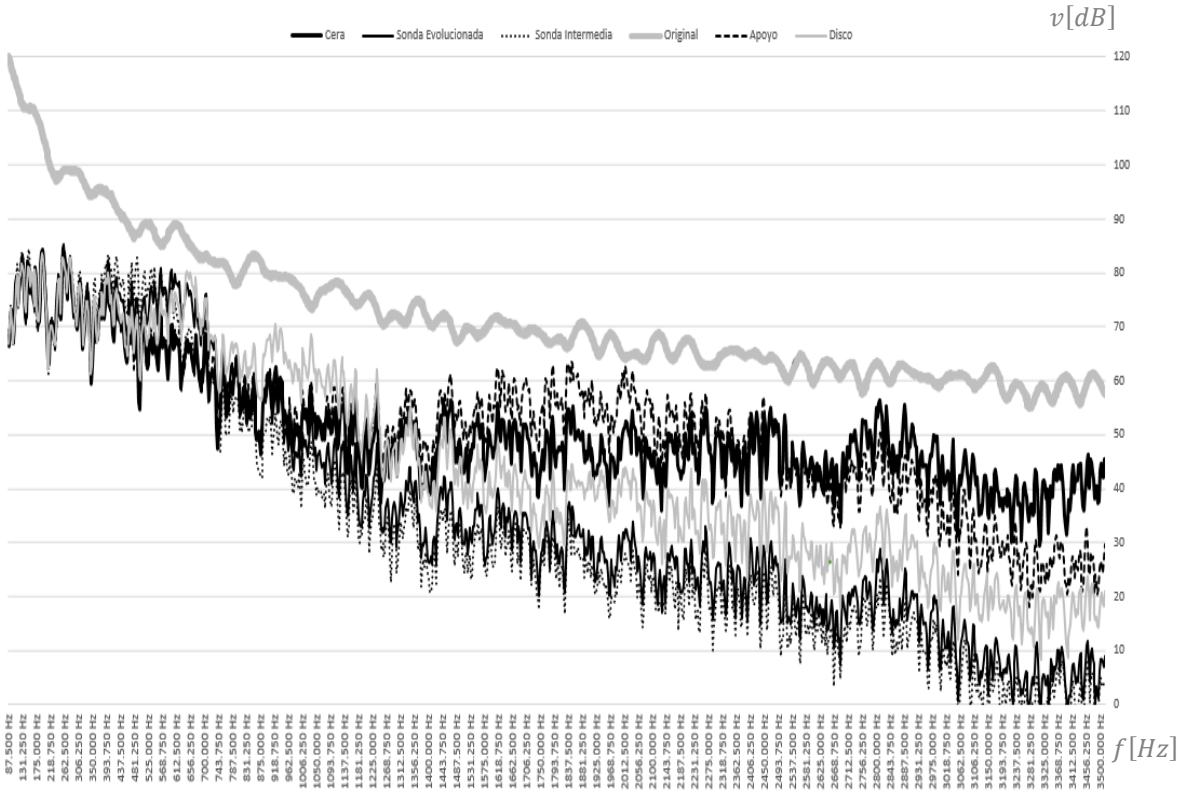



Figura 3. Comparativa de nivel de velocidad promediado obtenido en el punto A de la pared con cada uno de los montajes del sensor, en función del frecuencia.

La comparativa de nivel se realiza poniendo como referencia el montaje que según la normativa y la teoría es el más estable de todos los enfrentados en este experimento: acelerómetro con cera. De cara a determinar la contribución de los flancos al nivel de recepción, todas las mediciones se realizarán con el mismo sensor, y dado que se evalúan las relaciones relativas [3], está desviación en el apartado del nivel puede ser menos determinante en la detección de contribuciones.

Más relevancia tiene la dispersión de las medidas en los puntos de medida. Se ha optado por comparar el promedio de las desviaciones típicas en todos los puntos para cada uno de los montajes. Los resultados se aprecian en la *Figura 4*. Claramente se observa como 2 de las sondas se comportan parejas respecto al método de referencia, mientras otras 2 nos ofrecen resultados claramente mejorables.

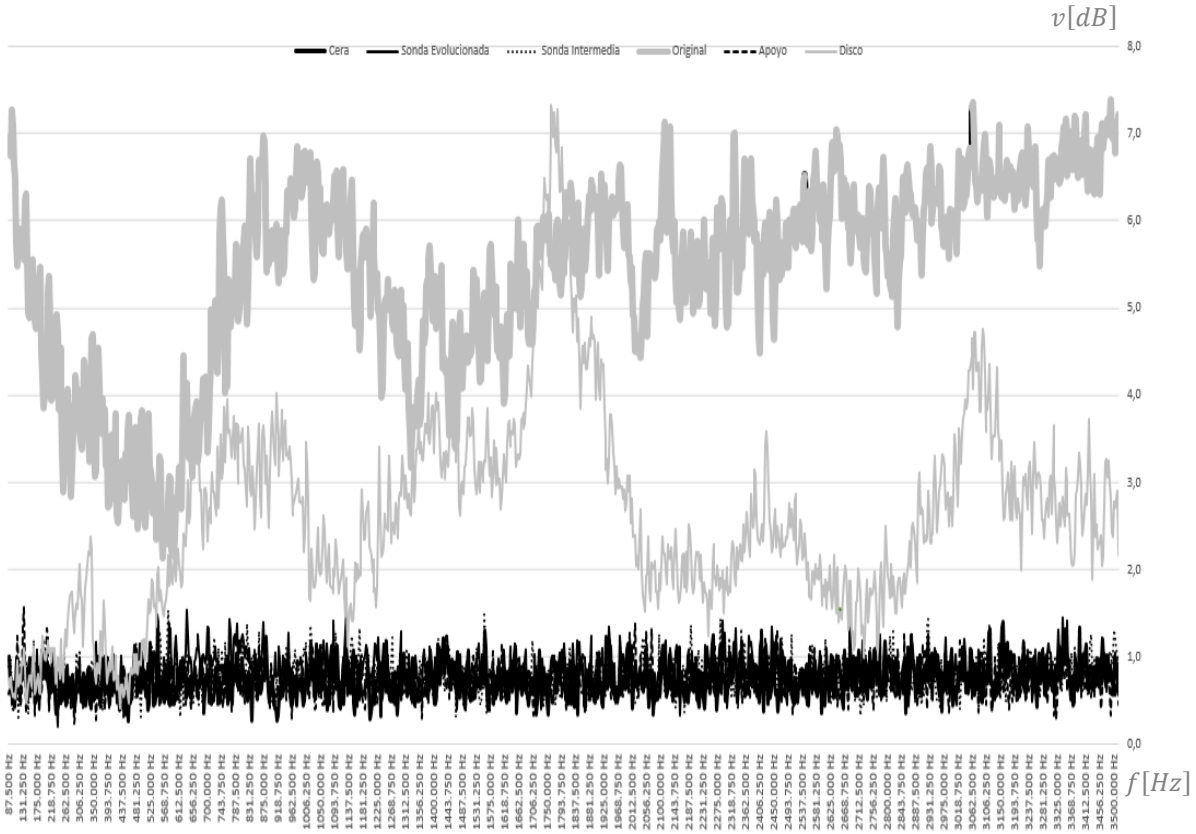



Figura 4. Promedio de la Desviación típica (σ) de las mediciones realizadas en todos los puntos del experimento, con cada uno de los montajes del sensor, en función de la frecuencia.

## CONCLUSIONES

Llegados a este punto se pueden distinguir dos tipos diferentes de conclusiones: referentes a la operativa de la sonda, y referentes a la calidad de las señales obtenidas por este sistema.

En cuanto a la operativa del sistema, en la realización de los ensayos se puede constatar la mejora en la eficiencia de los recursos empleados en el ensayo con sondas de este tipo:

- Se **reduce el tiempo de ensayo**, puesto que no se necesita aplicar cera durante la realización del ensayo, ni corregir caídas del sensor por la adherencia de la cera. Se estima que esta metodología de referencia incrementa el tiempo de ensayo en un 40% por punto de medid, respeto al empleo de la sonda.
- Se **mejora la intrusión de la adquisición** de vibraciones, eliminando cualquier tipo de residuo como la cera, o montajes y/o anclajes más complejos y que requieren mayores recursos temporales e incurren en costes adicionales.
- Se incrementa la **facilidad de manejo**, puesto que el agarre es mucho más ergonómico y el gesto de la muñeca es más relajado.
- Se amplía el **acceso a zonas complejas**, como pueden ser falsos techos, mediante la pequeña varilla, mejorando las posibilidades de muestreo.

Hablando de la calidad de las señales obtenidas, se concluye:

- Se **infravalora el nivel de velocidad**, en todo el rango de frecuencia. Este efecto es mucho más relevante a medida que aumenta la frecuencia. A pesar de disponer de una excitación por vía aérea de nivel suficiente, el aislamiento y la capacidad de vibración

de los paramentos es mucho menor con el incremento de la frecuencia. Por tanto los niveles son menores. La necesidad de transmitir la vibración por la varilla hace disminuir su nivel. A esto se une la respuesta en frecuencia de los sistemas con sonda, cuya resonancia se suele situar en torno a 1kHz, y como se comprueba con estos datos, su infravaloración de los niveles a partir de ella. Empleando la misma sonda en todas las superficies, nos interesan los niveles relativos, de modo que este hecho en si mismo es un obstáculo salvable.

- Se **contiene la desviación estándar** de las mediciones, frente a un método más robusto como el de la cera. La sonda intermedia y actual tienen valores muy similares a los del método con cera, con desviaciones máximas de 0.8dB. Teniendo en cuenta un análisis de resolución elevada como es la FFT, se pueden equiparar los métodos en lo que a repetibilidad se refiere; más aún sin la necesidad de obtener valores absolutos.

A través de este experimento se observa la evolución de una sonda de vibraciones diseñada para una aplicación específica. Se obtiene una señal con calidad razonable y se mejora significativamente la operativa de la adquisición de datos. Así, se alcanza el objetivo de simplificar las mediciones para evaluar las transmisiones por flancos en un recinto.

A partir de los datos y conclusiones obtenidas en este proyecto, se plantean nuevas líneas de actuación: mejorar la representatividad de los valores de señal adquiridos, tratando de corregir la problemática encontrada; y optimizar en paralelo la operativa de los ensayos.

## REFERENCIAS

[1] UNE-EN ISO 16283-1:2014. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.; 2014.
[2] Ministerio de Fomento, Gobierno de España. Código Técnico de la edificación (CTE). Documento básico HR, Protección frente al ruido (DB-HR); 2009.
[3] Aniorte Pérez, José Antonio y Domingo Bets, Salvador. “Método matricial para la ingeniería de aislamiento acústico”. 41º Congreso nacional de Acústica, Tecniacústica León; 2010.
[4] Rosao, V. et Carreira, A. “Use of vibration measurements to determine the most suitable locations to improve sound insulation in buildings”. The 21st Congress on Sound and Vibration (ICSV), Beijing/China; 2014.
[5] UNE-EN ISO 10848-1. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 1: Documento marco; 2007.
[6] UNE-EN ISO 10848-2. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 2: Aplicación a elementos ligeros cuando la unión tiene una influencia pequeña; 2007.
[7] UNE-EN ISO 10848-3. Acústica. Mediciones nivel de vibración in situ. Medida en laboratorio de la transmisión por flancos de ruido aéreo y del ruido de impacto en recintos adyacentes. Parte 3: Aplicación a elementos ligeros cuando la unión tiene una influencia importante; 2007.
[8] UNE-EN ISO 140-4:1999. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "in situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales; 1999.
[9] UNE-EN ISO 9614-1:2010. Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la intensidad del sonido. Parte 1: Medición en puntos discretos.; 2010.
[10] N.B. Roozen, et al., Determining radiated sound power of building structures by means of laser Doppler vibrometry. Journal of Sound and Vibration (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.02.029i
[11] H-E de Bree, V.B. Svetovoy, R. Raangs, R. Visser. “The very near field; theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field”, ICSV11, St. Petersburg; 2004

[12] Rodrigues Andrade, C.A. Estudio vibro-acústico e intensimétrico de las transmisiones por flancos en edificios; 2009. Tésis Doctoral, Universidad de Valladolid.
[13] Cremer, L., Heckl, M., Petersson, Björn A.T. Structure-Borne Sound; 2005.
[14] Hopkins, C. Sound insulation. Elsevier/Butterworth-Heinemann; 2007.
[15] Serridge, M., Licht, T.R. B&K. Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers; 1987.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# RUIDO DE IMPACTOS, NUEVAS HERRAMIENTAS TEÓRICAS Y PRÁCTICAS

PACS 43.55.Rg

Manuel Taborga Pérez
Salvador Domingo Bets
Noiselab
Ctra. de Níjar – Los Molinos 56
04006 Almería
España
Tel. 950228899
E-Mail: tech@noiselab.net

## ABSTRACT

To estimate the impact noise, we have two alternatives. The empirical, following the methodology described in the standard ISO 12354-2, this standardization does not describe the casuistry of assessing the impact from bottom to top room, which if it is considered in DIN 4109. The other alternative is an *in situ* measurement; under controversy, due to the instrumentation used and the evaluation rates described in the ISO 717. This article presents a discussion on the available tools and how to combine them, in order to accurately estimate the impact noise.
**Keywords**: impact noise, ISO 12354-2, ISO rubber ball, Impact sound reduction index.

## RESUMEN

Para estimar el ruido de impactos tenemos dos alternativas. La empírica, siguiendo metodología de la norma ISO 12354-2, esta estandarización no describe la el evaluar el impacto de abajo hacia arriba, lo cual sí describe la Norma DIN 4109. La otra alternativa es una medición *"in situ"*; bajo controversia, debido a la instrumentación utilizada y a los índices de evaluación descritos en la ISO 717. Este artículo presenta una discusión sobre las herramientas y cómo combinarlas para estimar con certeza el ruido de impactos.
**Palabras clave**: ruido de impactos, ISO 12354-2, pelota de goma, Índice de reducción sonora a impactos.

## 1. INTROCUCCIÓN

Cuando se proyecta el aislamiento a ruido de impactos de una edificación, siempre calculamos dos casos: el primero, el local emisor está arriba y el receptor abajo. El segundo, uno junto al otro. Ambos están descritos en la Norma UNE -EN 12354-2:2001 [5]. Estas distribuciones espaciales no consideran cuando el impacto se produce de abajo hacia arriba. Esta y otras casuísticas están bien documentadas en la norma Alemana DIN 4109 [6]; y aunque no es de aplicación es España, sí que puede ayudarnos a una buena estimación del impacto.

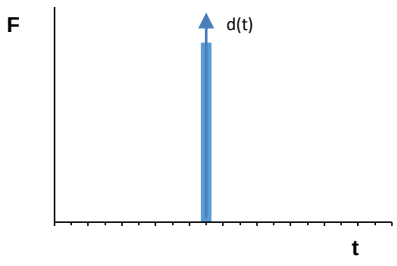
Al evaluar "in situ" el ruido de impactos, usamos un nivel de presión sonora en sala receptora como expresión de aislamiento, sin considerar la fuente de ruido y más aún sin aplicar espectro según la percepción humana (ponderación A). Sería conveniente utilizar un Índice de Reducción Sonora, y así realmente transformarlo en un valor de aislamiento.

Por otra parte, respecto a las fuentes de excitación que utilizamos normalmente para evaluar los ruidos de impactos; como la máquina de impactos normalizados, existe mucha controversia por su baja correlación respecto a los ruidos domésticos cotidianos. Con la introducción de la Pelota de Goma como fuente (ISO Ruber Ball), en la nueva ISO 16283-2 [4], podemos acercarnos más a la realidad.

En esta comunicación nos proponemos analizar estos tres aspectos anteriormente descritos, intentando llegar a un consenso en el uso de las herramientas disponibles e introduciéndonos a los nuevos cambios normativos establecidos y a los que están por venir.

## 2. CONCEPTOS

Entendemos por ruido de impactos al "sonido aéreo" radiado a un recinto por una pared o suelo de una edificación, cuando es excitado estructuralmente. Al generarse un impacto sobre una estructura, esta entra en vibración radiando parte de la energía que no es absorbida, a elementos constructivos que estén solidariamente conectados e incluso las partículas de aire adyacentes que son perturbadas, generando ruido aéreo inducido. En términos físicos, corresponde a una Fuerza impulsiva (F), de corta Duración (t), que cuando aplicamos el análisis de Fourier, encontramos que todas las Frecuencias (f) tienen la misma Intensidad (I).




Espacio temporal




Espacio frecuencial

Cuando estimamos el comportamiento acústico a impactos de un recinto a través de un elemento como el suelo. Lo podemos realizar de mediante un modelo de cálculo o una medición acústica *"in situ".*

### 2.1 Estimación del Ruido de Impactos en condiciones no descritas en Norma

Para el cálculo teórico contamos con la norma UNE EN 12354-2 [5], este modelo de cálculo presupone una "alta precisión" en la medición de los valores de entrada, además de una buena ejecución, también es muy importante que la situación concreta se adecue al modelo. En impactos verticales, podemos tener una desviación estándar de 2 dB, en impactos horizontales encontramos un error sistemático variable de 0-5 dB, con una desviación estándar de 3 dB.

La Norma describe dos modelos, el Detallado y el Simplificado. El primero, requiere un sinfín de datos de entrada como (presión acústica $L_n$, reducción nivel presión del recubrimiento $\Delta L$, reducción nivel presión de capas adicionales $\Delta L_d$, índices de reducción acústica del elemento excitado y de elemento flanco en el recinto receptor, además de su mejora $R_i$, $R_j$, $\Delta R_j$, tiempo de reverberación estructural $T_{s,lab}$; índice de reducción vibracional $K_{ij}$; área de elemento separador $S_i$, área del elemento flanco en receptor $S_j$, longitud de acoplamiento $L_{ij.}$). El segundo, es un método más simple; aunque con menos precisión, solo requiere como datos de entrada la densidad superficial del forjado, la rigidez dinámica del elemento de cobertura o su mejora $\Delta L$, el inconveniente radica en que es sólo aplicable a construcciones homogéneas de cemento y/o hormigón con suelos flotantes o recubrimientos blandos para recintos uno encima del otro de tamaño convencional en viviendas.

En esta revisión describiremos el método de cálculo simplificado de la norma, por su rapidez de cálculo para predecir un ruido de impactos. Así, calculamos según Norma UN EN 12354-2 [5]:

**Nivel de presión acústica ponderada de impactos normalizado global equivalente** de forjados homogéneos dentro del intervalo 100 a 600 Kg/m$^2$**, $L_{n,w,eq.}$:**

$$\mathbf{Ln,w,eq} = \mathbf{164} - \mathbf{35}\,\mathbf{lg(m`)}\ \mathbf{, (dB)}$$

**Índice de mejora acústica ponderado de impactos global del suelo flotante, $\Delta L_w$**:
Teniendo la rigidez dinámica por unidad de superficie (MNm/m$^3$) y la densidad superficial del suelo flotante (Kg/m$^2$), obtenemos el Índice $\Delta L_w$ de las tablas del anexo C de la Norma, o de fichas técnicas fiables.

**Corrección para la transmisión indirecta K:**
Conociendo la densidad media de los elementos flancos no cubiertos con capas elásticas **m`** (kg/m$^2$) y la densidad superficial del forjado, nos vamos a la Tabla 1 del punto 4.3.1 de la Norma, para obtener el valor K (dB).

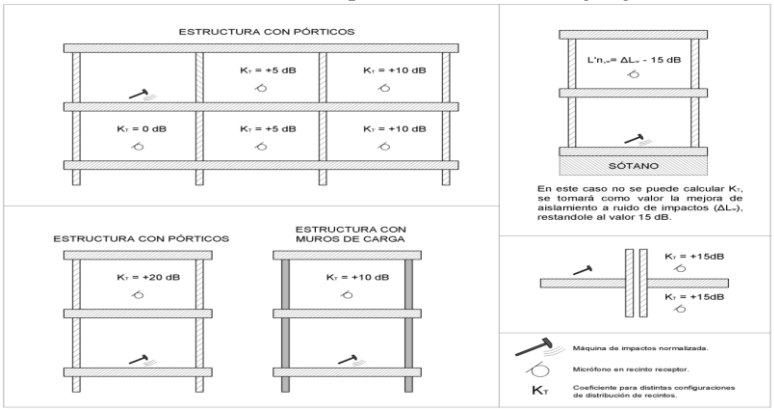
**Nivel de presión acústica ponderado de impactos normalizado $L`_{nw}$:**
La versión simplificada predice la presión acústica a partir de los valores ponderados de sus elementos según procedimientos de la norma EN ISO 717-2:2013 [3], su aplicación se reduce a recintos situados uno sobre el otro con forjado homogéneo, con la fórmula:

$$\mathbf{L`n,w} = \mathbf{Ln,w,eq} - \Delta\mathbf{Lw} + \mathbf{K}\ \mathbf{, (dB)}$$

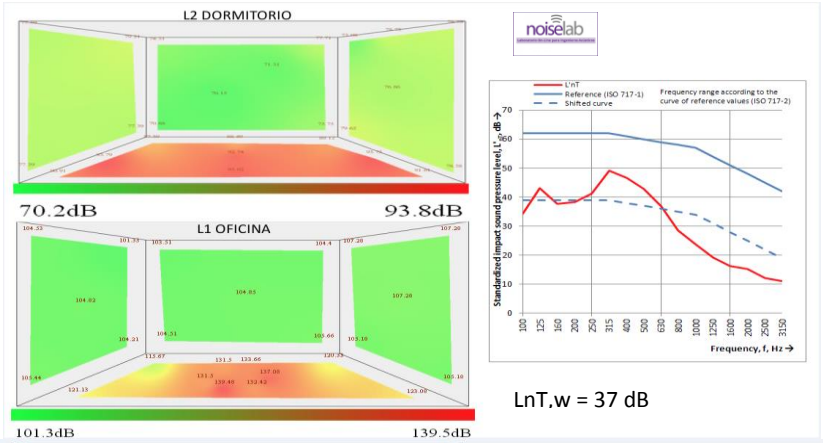
En este punto ya podemos calcular perfectamente las casuísticas del impacto de arriba hacia abajo y con el método detallado además de este, podríamos en vertical. Pero que pasa en el caso del "impacto de abajo hacia arriba", como en el caso de una actividad ruidosa como un restaurante, cafetería o pub bajo una vivienda. ¿Cómo llegamos a realizar una buena predicción sin sobreestimar o subestimar?

Para esta casuística la norma Alemana DIN 4109/11.89 [6], define el mismo valor $\mathbf{L`_{n,\,w}}$, pero añade además un valor **KT**, dependiendo de las configuraciones de distribución de recintos y sistemas constructivos; creando una relación entre punto de excitación y propagación. Agregando este valor a la fórmula obtenemos:

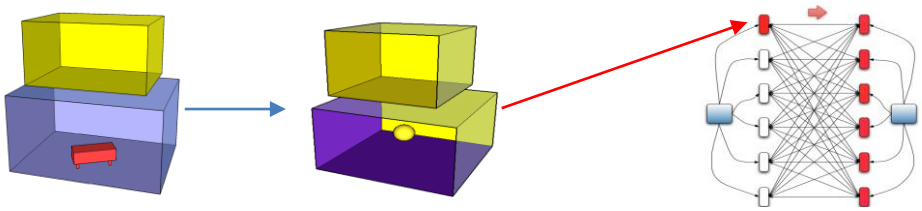
$$\mathbf{L`n,w = Ln,w,eq - \Delta Lw + K - Kt\ ,\ (dB)}$$




Utilizando Noise Mapper de Noiselab, analizamos la transmisión de vibraciones por elementos, además del ruido aéreo producido por la máquina de impactos en L1 y L2 (Leq), en ambos sentidos de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, de una oficina en planta inferior respecto a un dormitorio en planta superior representado en las siguientes gráficas.



Con estos valores de vibraciones en paramentos (paredes, suelo, techo) y nivel de presión en recintos, podemos analizar el intercambio energético entre diversos sistemas vibrantes, a través del análisis SEA de elementos y recintos según su disposición. Finalmente obteniendo una matriz capaz de correlacionar y establecer los nuevos valores KT, como se ve en las figuras siguientes:



### 2.1 Uso del Índice de Reducción Sonora en vez del Nivel de Presión Sonora

Cuando evaluamos los datos obtenidos de la medición *"in situ",* usamos la Norma ISO 717-2 [3], que describe el aislamiento con una cantidad numérica LnT [7], w. Pero aquí entra la gran duda, ¿porque utilizamos índice nivel de presión sonora (Ln), en vez de índice de reducción sonora (R)?. Si lo comparamos con ruido aéreo, causa confusión expresar el aislamiento de diferentes maneras, por eso se plantea la idea de un índice de reducción sonora a impactos ($R_{impacto}$). Este índice de reducción sonora debería estar caracterizado para las diferentes fuentes de ruido (máquinas de impacto, bola, personas caminando), y se podría definir de la siguiente manera (2):

$$R = \log \frac{Pf}{Pr}, \text{ (dB)}$$

Pf: potencia de la fuente utilizada
Pr: potencia radiada en receptor

No hay que confundir (Pf) bajo condiciones de impedancia entre la fuente y la estructura ($Pf_z$), con potencia inyectada (Pi), que es la proporción de la energía que se transmite a la estructura. La diferencia entre potencia máxima disponible y potencia inyectada debe ser considerada como parte de la capacidad de aislamiento del receptor y no ser excluida del numerador (Pf), el cual sólo depende de las propiedades mecánicas de la fuente. Por otro lado (Pr), depende del nivel de presión sonora y del área de absorción equivalente.
Así de manera más general, el índice de reducción sonora (R) tiene la ventaja de especificar la fuente de ruido, por lo que las predicciones son válidas para el tipo de fuente medida, así como a la fuente de referencia usada. Desarrollando la fórmula, índice de reducción sonora (R):

$$R = 10 \log \frac{Pc\,(fi)}{Prad\,(fi)}, \text{ (dB)}$$

Pc: potencia característica de fuente de impacto aplicada (fi)
Prad: potencia radiada en receptor, con fuente de impacto específica (fi)

Si lo relacionamos con la fuente:

$$R_{impacto} = 10 \log \left(\frac{10^{LPref/10}}{10^{LPref-Rif}}\right), \text{ (dB)}$$

LPref: potencia característica de fuente de referencia
Rif: índice de reducción sonora para la fuente utilizada (puede diferir en amplitud pero no en movilidad con respecto a LPref)

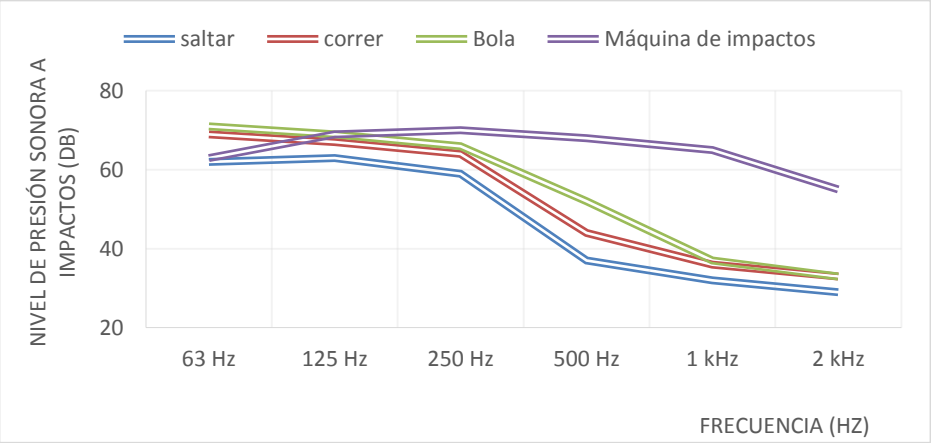
$$R_{if} = Lp_{car} - Lp_{rad}, \text{ (dB)}$$

$Lp_{car}$: potencia característica de fuente de referencia
$Lp_{rad}$: índice de reducción sonora determinado con la fuente utilizada

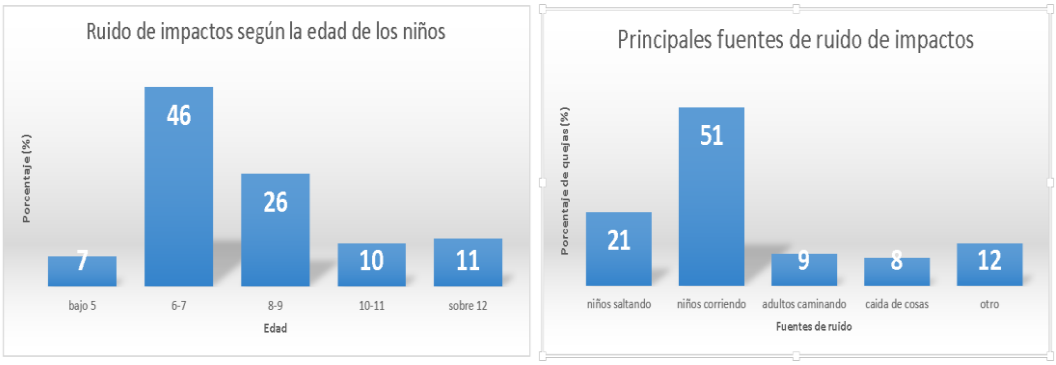
### 2.3 Fuentes de Ruido para determinar Aislamiento a Ruido de Impactos

Esencialmente comparan movilidad mecánica del elemento respecto al receptor. En ruido aéreo la fuente es un campo acústico en el aire. En impactos, muchas fuentes de muy diferentes características dinámicas ocurren, y los resultados alcanzados con una fuente no pueden ser transferidos a las propiedades mecánicas de la fuente y el receptor. En el caso de la máquina de impactos normalizada, la excitación proveniente de 500 g de martillos de acero cayendo en el suelo, ¿es un evento importante en nuestra vida cotidiana? [8], es de poco interés práctico y menos representativo de lo que realmente nos interesa "pisadas". Si nos planteamos otra pregunta, ¿qué es lo que oímos?, LnT no lleva ponderación (A), ¿dónde quedan los rangos de audibilidad?[9]

La primera aproximación vino en la ISO 140-11 (ahora ISO 10140-3) [10], donde se expone la máquina de impactos modificada, con una capa suave bajo los martillos, representa mejor los ruidos de vecinos en un edificio, aunque todavía no ha sido implementada en algún sistema [8]. En la nueva norma UNE EN ISO 16283-2 [4], aparece una nueva herramienta el balón de goma (ISO Rubber Ball), los resultados muestran que el impacto de la bola es similar al ruido de niños corriendo y saltando, además de correlacionarse bien con la respuesta subjetiva del ruido. En el siguiente gráfico podemos ver las frecuencias características de impactos reales generados por niño de 26 kg y de las fuentes de impactos utilizadas para evaluar [1] :




Claramente la máquina de impactos no es un buen descriptor de los fenómenos más comunes, que ocurren en una vivienda, los cuales podemos ver en el grafico siguiente [1]:




En un futuro $R_{impacto}$ debe ser reemplazado por $R_{caminado}$ o $R_{maquina\ de\ impactos}$. Una pregunta importante es ¿fuerzas perpendiculares en el suelo o edificios son las más importantes?, ¿qué pasa con el arrastre de elementos como sillas o cajas?

## 3. CONCLUSIONES

Se debería analizar en profundidad el ruido de impactos según la disposición espacial y utilizar la gran cantidad de herramientas disponibles como SEA, Elementos Finitos, para así, poder caracterizar a través de un coeficiente (Kt), un valor que refleje la distribución espacial según sistema constructivo.

El índice de reducción sonora es el mejor indicador del aislamiento a ruido de impactos; refleja un aislamiento y no un nivel de ruido, con lo cual se expresa en los mismos términos que el aislamiento a ruido aéreo, eliminando errores comunes de interpretación y además permite referenciarlo según niveles audibles.

Después de analizar las distintas fuentes de impactos, sería conveniente promover el uso de la Bola de goma, ya que tiene mejor correlación respecto a los impactos domésticos. Los requerimientos y uso están descritos en la norma ISO 16283-2.

## 3. REFERENCIAS

**[1]** **J. Jeon, J. Ryu, J. Ho Jeong**: Review of the Impact Ball in Evaluating Floor Impact Sound. Acta Acustica United with Acustica. Vol, 92 (2006) 777-786.

**[2]** **W. Scholl, R. Ciszewki, and V. Wittstock**: Revision of 717, Why Not Use Impact Sound Reduction Indices Instead of Impact Sound Pressure Level? Part 2 – Application to Different Impact Sources. Acta Acustica United with Acustica. Vol, 99 (2013) 917-930.

**[3]** **ISO 717**: Acoustic – Rating of sound Insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation. (2013).

**[4]** **ISO/DIS 16283-2**: Acoustic – Field measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements – Part 2: Impact sound Insulation. 2013 (under development).

**[5]** **UNE – EN 12354-2**: Acústica de la edificación – Estimación de las características de las edificaciones a partir de las características de sus elementos – Parte 2: Aislamiento acústico entre recintos.

**[6]** **DIN 4109**: Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren: Beiblatt 1. (1989).

**[7]** **DB HR**: Protección frente al ruido. Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 1371/2007.

**[8]** **W. Scholl**: Impact sound Insulation: The standard tapping machine shall learn to walk! – Journal of Building Acoustics 8 (2001) 245-256.

**[9]** **W. Scholl, J Lang and V. Wittstock**: Rating of sound insulation at present and in future – The revision of ISO 717. Acta Acustica United with Acustica 97 (2011) 686-698.

**[10]** **UNE – EN ISO 10140-3**: Acústica – Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de Impactos.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# VERIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE CALIDAD ACÚSTICA EN EDIFICACIÓN MEDIANTE SOFTWARE

PACS: 43.55.Rg

Cástor Rodríguez Fernández
Sound of Numbers, S.L.
Av. Peregrina 21 P92A Bertamiráns
15220 Santiago de Compostela – A Coruña
+652770034 - castor@soundofnumbers.net

## Abstract

In several European countries, besides having minimum acoustic insulation requirements for buildings, they also have classification schemes for building acoustic quality. According to the acoustic performance of the building, a dwelling can get a classification. In this article it is presented a tool that provides the ability of determining the acoustic classification of an entire building, in any of the classification schemes, even optimizing and reviewing the acoustic performance. This software uses the computation method described in EN12354 norm, and also provides a tool for a subjective evaluation of the acoustic quality: 3D auralization.

## Resumen

En varios países Europeos, además de contar con unos requerimientos mínimos de aislamiento acústico a ruido exigibles a la edificación, se cuenta con esquemas de clasificación de la calidad acústica de los edificios. En función de los niveles de prestación acústica alcanzados, una vivienda podrá obtener una clasificación determinada. En este artículo se presenta una herramienta que proporciona la posibilidad de determinar la clasificación acústica de un edificio completo en cualquiera de los esquemas de clasificación europeos, incluso revisando y optimizando el comportamiento acústico. El software presentado utiliza el método de cálculo descrito en la familia de normas EN12354 y además aporta una herramienta de evaluación subjetiva de la calidad acústica: la auralización 3D.

## 1 INTRODUCCIÓN

En este artículo se actualiza el análisis realizado en [1] con las nuevas funcionalidades del software SONarchitect.

En los últimos años, se ha llevado a cabo en Europa una revisión importante de los requerimientos de aislamiento acústico en la edificación. Durante el año 2004 se realizó en Europa una comparativa de requerimientos en 24 países, no sólo a nivel de exigencia sino también comparando el tipo de descriptores utilizados y el rango de frecuencia aplicado. Existe disparidad de criterios a la hora de definir un único esquema europeo común: tanto en los descriptores utilizados ($D_{nT}$, $R'_w$, $R'_w+C_{tr}$,…) como en la definición del número de clases y los umbrales de clases. En las referencias [2] a [5] se detalla la descripción de los esquemas de clasificación actualmente vigentes en Europa, su evolución y se analiza la dificultad que existe en el establecimiento de criterios objetivos de calidad que sean representen adecuadamente la reacción del usuario ante el nivel de calidad percibido (es decir, el grado de confort acústico percibido sea coherente con el valor objetivo del descriptor acústico).

SONarchitect [7], permite el cálculo de las prestaciones acústicas de todo un edificio mediante los métodos descritos en la familia de normas EN 12354. El tiempo de cálculo del programa permite optimizar el diseño, al no resultar pesado el proceso iterativo cálculo-modificación-recálculo.

En este artículo se revisan algunas de las características del programa y se describen las nuevas capacidades desarrolladas, como la posibilidad de establecer la clasificación acústica del proyecto, permitiendo elegir cualquiera de los esquemas de clasificación actualmente vigentes en Europa. El software, además, incluye una herramienta de auralización en 3D que permite facilitar la comprensión del concepto de calidad acústica y aclarar algunos conceptos básicos a profesionales, claves en el proceso de construcción (arquitectos, arquitectos técnicos, promotores), no familiarizados con la acústica.

## 2 REVISIÓN GENERAL DEL CÁLCULO AUTOMÁTICO MEDIANTE EN12354

SONarchitect proporciona el cálculo automático del aislamiento acústico en un edificio del aislamiento a ruido aéreo y de impacto, aislamiento a ruido exterior, y la emisión de ruido desde los recintos ruidosos del edificio hasta el exterior. Calcula además el tiempo de reverberación. Todos los cálculos se realizan conforme a las normas EN12354, partes 1, 2, 3, 4 y 6 (ISO 15712) Los cálculos se efectúan a partir de los planos del edificio sin la necesidad de aplicar restricciones geométricas.

Los índices de reducción vibracional, Kij, se eligen de forma automática a partir de la información que el procesador geométrico extrae y del tipo de material seleccionado por el usuario. Los cálculos se realizan en tercios de octava y los requisitos del proyecto se pueden seleccionar de forma automática.

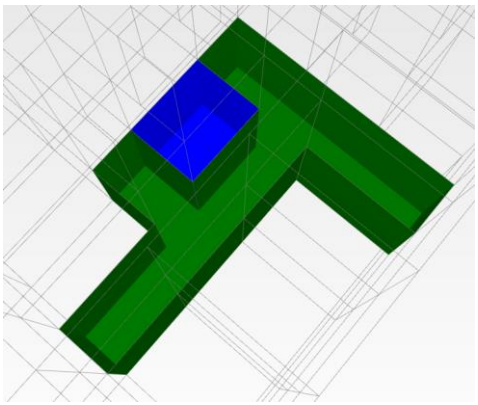


**Figura 2 - Geometría recintos SONarchitect**

El usuario puede navegar por todas los recintos del edificio presentado en 3D e investigar cuál es el valor del aislamiento calculado para todos los elementos del edificio, tanto cuando estos actúan como vía directa como cuando actúan como flanco. El programa permite además extraer un histograma que representa el comportamiento global del edificio. Simmons en [8] analiza el impacto que tienen sobre los resultados de cálculo, las aproximaciones y simplificaciones que el usuario debe realizar durante el proceso de modelado.Como se ha comentado anteriormente, uno de los principales problemas relacionados con el uso de herramientas de diseño tradicionales es la dificultad que surge al tratar con geometrías complejas. El usuario se ve forzado a aproximar todas las posibles formas geométricas que se encuentra en los planos del edificio por cajas rectangulares. La Figura 1 muestra como ejemplo uno de los casos en los que la utilización de herramientas tradicionales de cálculo

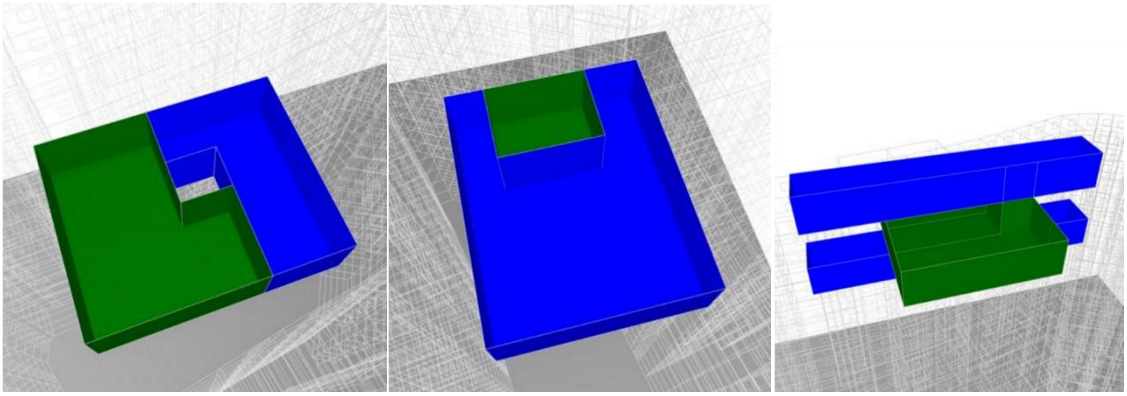


**Figura 1 - Ejemplos de geometrías donde no puede utilizarse el modelo de cajas**

puede conducir a errores en la estimación del aislamiento. En la figura, se muestran dos recintos que comparten tres elementos separadores comunes. Con herramientas tradicionales, el usuario debe asumir que el tabique separador es único, lo que conduce a un error en la estimación del tiempo de reverberación estructural (no se tiene en cuenta la atenuación provocada por la esquina) y de la longitud de absorción equivalente. El usuario se ve forzado a definir “recintos equivalentes” y deberá poner especial cuidado al definir los “nuevos flancos equivalentes” para no modificar las longitudes y las superficies correspondientes y mantener así el correspondiente índice de reducción sonora del flanco. En el caso de recintos en U para transmisión horizontal o L en el caso de transmisión vertical, las simplificaciones de cajas rectangulares no son posibles. La Figura 2 muestra algunos de los casos donde la aproximación de cajas rectangulares no es utilizable.

SONarchitect ISO calcula la transmisión sonora a través de cada elementos separador y de cada par de flancos sin restricciones geométricas y suma todas las contribuciones de los caminos de propagación entre el recinto fuente y receptor. El programa incluye herramientas de dibujo que permite recrear la geometría completa en 3 dimensiones de un edificio. El trazado del plano puede realizarse a partir de la importación de ficheros en formato “.dxf”, como indica la Figura 3.

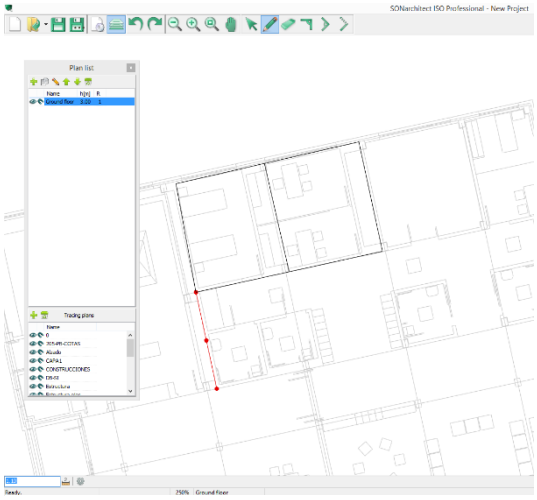


**Figura 3 - Trazado sobre DXF**

El programa contiene un potente procesador geométrico que reconoce automáticamente los volúmenes del edificio y detecta las intersecciones entre paramentos, etiquetando el tipo de unión (cruz, uniones en T,…). Es decir, SONarchitect selecciona automáticamente el índice de reducción vibracional, Kij, apropiado para cada tipo de unión. Al contrario que en otras herramientas convencionales, no hay necesidad de especificar si una unión es en "T", "L" o "X", o si los elementos son ligeros o si la unión corresponde con una fachada ligera. Toda esta información está implícita en el proceso de introducción de la geometría y de los elementos constructivos. Se han incluido algunas extensiones a los índices de reducción vibracional, que permiten mejorar la estimación del aislamiento en el caso de encuentros entre la tabiquería interior y tabiques dobles [12]. Actualmente se están desarrollando y validando nuevas expresiones mediante la utilización de elementos finitos [13]. La única información adicional necesaria para la perfecta definición de uniones, son las juntas elásticas. Si se desea incluir la utilización de bandas elásticas en los encuentros, el usuario cuenta con el modo de configuración de las uniones, Figura 4, que implementa el interfaz.

Los materiales constructivos se seleccionan de la base de datos, Figura 5, donde se incluyen más de 2000 soluciones constructivas de distintas bases de datos y fabricantes europeos, con datos de aislamiento en laboratorio en tercios de octava. El usuario puede además diseñar sus propias soluciones constructivas. Se han desarrollado diferentes herramientas que permiten al usuario definir nuevos materiales, utilizando diferentes ecuaciones par la predicción del aislamiento, incluidas en el apéndice B de la norma EN 12354-1, apéndice C de la EN 12354-2 y otras expresiones de la ley de masas publicadas por distintos autores, como Cremer, London, Josse-Lamure, Price-Crocker, Sewell, Brekke y Arau. Se ha implementado además el método de impedancia para medios multicapa.

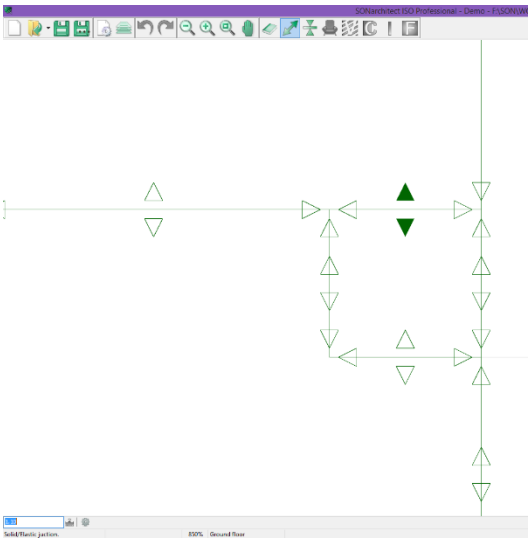


**Figura 4 - Definición e uniones elásticas**

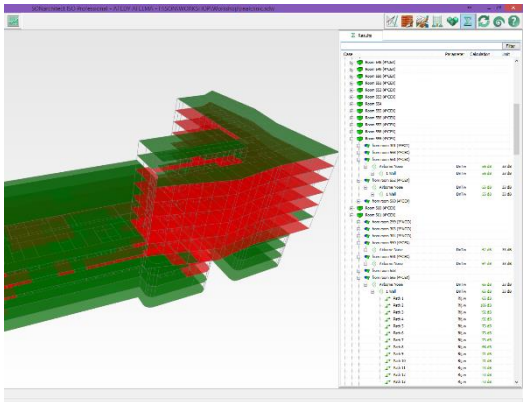


**Figura 5 - Árbol de resultados**

Los cálculos del aislamiento *in-situ* se presentan en un árbol de resultados, tal como indica la Figura 5. Para cada resultado presentado en el árbol se puede desplegar para determinar la contribución de cada uno de los flancos que intervienen en cada caso. Para cada resultado se puede imprimir una ficha justificativa en formato *pdf.*

Los pares de recintos que no verifican los requerimientos establecidos durante la fase de configuración del proyecto se representan en color rojo (recordemos que los requisitos y límites de aislamiento son totalmente configurables). El programa además asigna color rojo a las vías de transmisión que lastran el cumplimiento de los requisitos, y naranja a los susceptibles de cambio, permitiendo localizarlas con rapidez dentro del árbol de resultados.

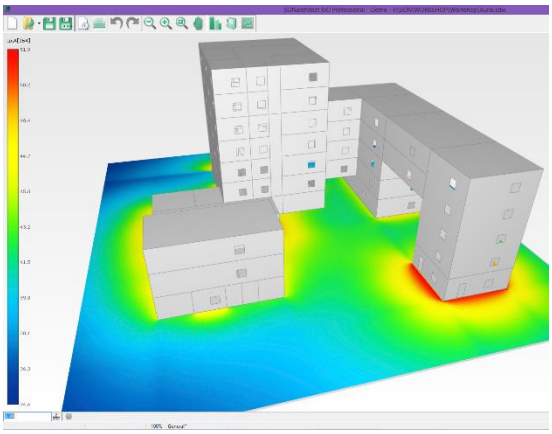


**Figura 6 - Nivel de presión sonora exterior**

Además de los resultados de aislamiento según las partes 1, 2 y 3 de la norma EN 12354, el programa calcula la radiación hacia el exterior de los recintos clasificados como ruidosos, es decir, la parte 4 de la norma. Para ello, previamente el usuario deberá indicar los valores de presión sonora máxima en el interior del recinto (Figura 6). Poniendo en práctica el Anexo E, se pueden estimar los niveles de presión sonora exteriores.

Se incorpora además una nueva posibilidad: la auralización de los resultados de los cálculos. La auralización permite la evaluación subjetiva del proyecto, más allá de los requisitos legales establecidos y además trasladar el significado de las magnitudes acústicas manejadas a usuarios o clientes no familiarizados con ellas. El programa incluye algunos ficheros para permitir al usuario evaluar subjetivamente el aislamiento conseguido en el proyecto utilizando distintos tipos de fuentes sonoras, pudiendo también incluir ficheros propios. En la Figura 8 se presenta el entorno 3D de escucha, en el que el usuario se puede desplazar por ambos recintos y apreciar las diferencias, puesto que posee procesado binaural. Puede además observarse en la Figura 7 que se propone una *etiqueta de eficiencia acústica*, en analogía a la utilizada en eficiencia energética, además de declarar el cumplimiento con los requisitos legales mínimos establecidos. Esta etiqueta se otorga en función del esquema de clasificación acústica correspondiente.

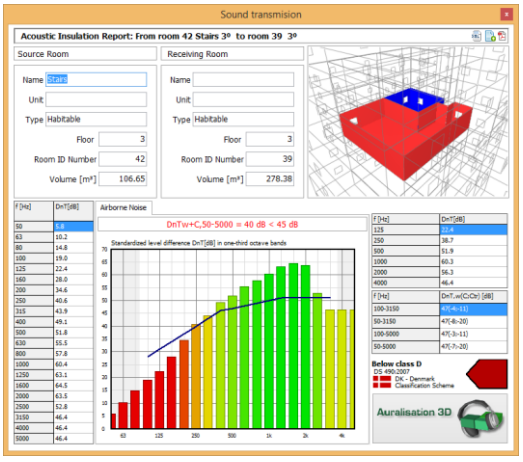



**Figura 7 - Ficha de resultado con clasificación**

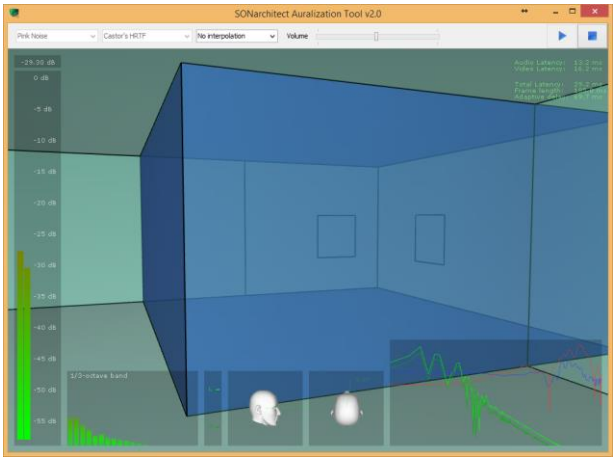



**Figura 8 - Entorno de Auralización 3D**

## 3 CLASIFICACIÓN ACÚSTICA DE EDIFICIOS: OPTIMIZACIÓN

El objetivo del establecimiento de un esquema de clasificación es el de garantizar unos niveles de confort acústico determinado, en función de la clase. La definición de las clases más elevadas debería ir orientada hacia el objetivo de que un 100 % de los usuarios del edificio declaren no percibir molestias procedentes de las actividades desarrolladas por otros ocupantes del edificio. Actualmente, los requisitos mínimos de aislamiento acústico establecidos en Europa, suponen un nivel de confort acústico donde únicamente un 40% de los usuarios de una vivienda que cumpla el mínimo establecido se declararían satisfechos. Claramente los requisitos legales garantizan un umbral de confort mínimo, pero este mínimo no es suficiente.

Los esquemas de clasificación se aplican a cada par de recintos. Entonces, ¿cómo podemos clasificar una habitación a partir de las clases de los paramentos? ¿Cómo podemos asignar una clase a una vivienda a partir de la clasificación de las habitaciones? ¿Cómo asignar una etiqueta acústica a un edificio? ¿Hay algún interés en este proceso?

Un esquema de clasificación acústica resulta de interés sólo si implica una globalidad, de nada sirve que nos digan que un electrodoméstico tiene un determinado consumo en sólo uno de sus componentes, y no en otros. En edificación ocurre lo mismo con la eficiencia energética, no se analiza sólo una habitación, sino toda la vivienda. Llevando esta filosofía al aislamiento acústico, es necesario elevar el esquema de clasificación hasta el nivel de vivienda.

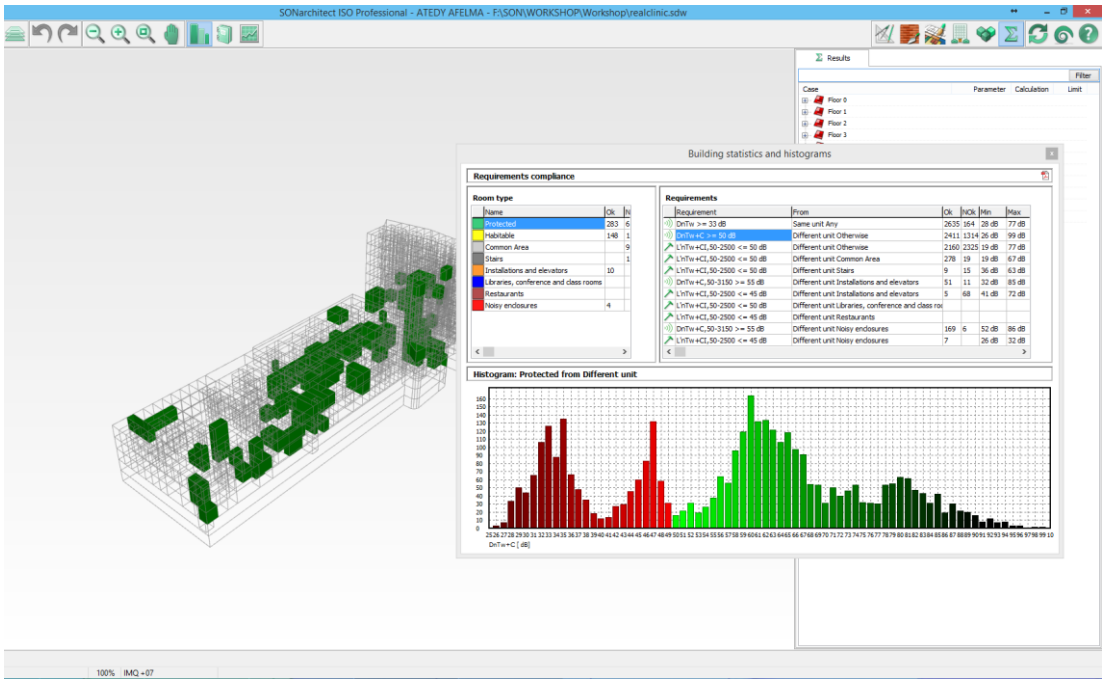



**Figura 9 - Histogramas interactivos**

Por otra parte, el problema de establecer un sistema de clasificación, puede no ser tan importante para los usuarios finales como para los promotores o los legisladores. No es incompatible, o al menos no lo parece, mantener en el mismo edificio viviendas que pertenecen a distintas clases. Puede haber usuarios que prefieran pagar algo más por un grado de confort acústico superior. En el aseguramiento de la calidad, el eslabón más débil establecerá el nivel de calidad del conjunto. De este modo, la clase de una habitación debería ser definida a partir de la peor de las particiones. De poco importa si el 90 % de las colindancias de un recinto es de clase A, si una de las particiones es de clase D. Del mismo modo, la clase de una vivienda debería ser establecida a partir de la clase de la habitación con peor clasificación. Claramente, si en fase de proyecto resulta complicado establecer el caso peor para dar conformidad a un

mínimo legal, cuando hablamos de la verificación de la calidad y del establecimiento de clases en las viviendas de un edificio, el 100 % de las viviendas debe ser verificadas, y, al menos en cada vivienda, ser capaces de detectar la habitación y la partición con clase mínima. Si una habitación de un edificio pertenece a una clase determinada, ¿puede deducirse que todas las habitaciones de una vivienda pertenecen a la misma clase?, si se ha establecido una clase para una vivienda, ¿podemos inferir que todas las viviendas de un edificio pertenecerán a la misma clase? Estas cuestiones se resuelven parcialmente echando un vistazo a un histograma obtenido calculando el 100% de los paramentos de un proyecto. En la Figura 9 se muestra el histograma correspondiente al aislamiento a ruido aéreo de un proyecto real. Se observa una gran dispersión de resultados y revela como es difícil establecer conclusiones o extrapolaciones para todas las particiones de un edificio (es decir, para todas las habitaciones y viviendas) a partir del conocimiento de un conjunto pequeño de ellas. Si todas las plantas de un edificio presentan la misma distribución, los resultados podrían extrapolarse a partir el cálculo de tres plantas. Con SONarchitect se facilita enormemente la tarea de la optimización, ya que los histogramas que se obtienen son interactivos, pudiendo así saber qué grupos de recintos están situados en qué valor de aislamiento, aplicando mejores soluciones a los aislamientos más pobres, y soluciones más pobres a los aislamientos más fuertes. Llevando a cabo iteraciones que sigan este mecanismo, se puede optimizar el comportamiento acústico de todo un edificio, sintonizando la forma del histograma según la calidad acústica deseada.

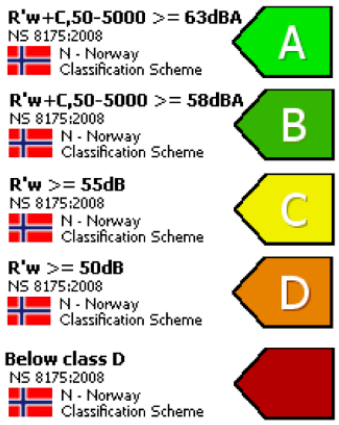



**Figura 10 - Esquema de clasificación Noruego**

La Figura 10 muestra una propuesta de etiquetado atizado por SONarchitect adaptado al esquema de clasificación noruego. Ahora faltaría la definición estadística de clasificación acústica. Si el 98% de los pares de recintos de una vivienda cuentan con un aislamiento acústico de clasificación A, ¿quiere decir eso que esa vivienda sólo puede optar a una clasificación inferior? Se plantea aquí la posibilidad de definir calidad en términos estadísticos, para eso habría que redefinir los parámetros de calidad acústica, así como sus clases.

## 4 CONCLUSIONES

En este artículo se ha discutido el entorno de los esquemas de clasificación acústica. Se han revisado las características de SONarchitect y la inclusión de nuevas herramientas para la verificación del confort acústico: una herramienta de auralización y la propuesta de SONarchitect de utilizar un sistema de etiquetado como sistema para describir la clasificación acústica de un edificio y la optimización de la calidad acústica del edificio como conjunto.

## REFERENCIAS

[1] Rodríguez Fernández, C., Rodríguez Molares A., Martín Herrero, J. y Sobreira Seoane, M: Sistema para la verificación de la calidad acústica en edificios: SONarchitect. Tecniacústica León 2010

[2] Rasmussen, B.; Rindel JH. Concepts for evaluation of sound insulation of dwellings-from chaos to consensus?. Proceedings Forum Acusticum 2005. Budapest, “IN- CDROM”

[3] Rasmussen, B.; Rindel JH. Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe. Applied Acoustics, Volume 71, Issue 3, March 2010, Pages 171-180

[4] Rasmussen, B. Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe. Applied Acoustics, Volume 71, Issue 4, April 2010, Pages 373-385

[5] Rasmussen, B. Sound insulation of residential housing – building codes and classification schemes in Europe. In Handbook of noise and vibration control. USA: Wiley & Son; 2007. Crocker Malcolm J, editor-in-chief.

[6] Espinel Valdivieso, A.; Igualador Pascual, Fernando; Frias Pierrad, Juan. Proposal of acoustic classification scheme in Spain. Proceedings INTERNOISE 2010, Lisboa, Portugal, Junio 13-16. IN CD-ROM.

[7] Sobreira Seoane, M.; Rodríguez Molares A and Martín Herrero J. Automatic calculation of sound insulation following UNE 12354 in a whole building. Proceedings Euronoise 2009. Edimbourgh, Scotland, October 26-28 2009. IN CD-ROM.

[8] Christian Simmons. Reproducibility of measurements with ISO 140 and calculations with EN 12354. NT Technical Report. ISSN 0283-7234

[9] European standard EN 12354. Building Acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements.

– Part 1: Airborne sound insulation between rooms (2000)

– Part 2: Impact sound insulation between rooms (2000)

– Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound (2000)

– Part 4: Transmission of indoor sound to the outside (2000)

– Part 5: Sound levels due to service equipment in buildings, prEN 2004

– Part 6: Sound absorption in enclosed spaces (2003)

[10] Rindel JH. Acoustic quality and sound insulation between dwellings. J Build Acous 1999;5:291–301.

[11] Rasmussen, B. Facade sound insulation comfort criteria in european classification schemes for dwellings. Euronoise 2006. Tampere, Finland, 30 May-1 June 2006, “IN-CD ROM”.

[12] Metzen, Pedersen, Sonntag. ”Extending the CEN calculation model for sound transmission in buildings to heavy double walls as separating and flanking walls”. Forum Acusticum, Sevilla, 2002.

[13] Rodríguez-Molares, A.; Sobreira-Seoane, M.A. “Determination of vibration reduction index by numerical calculations”. Proceedings Euronoise 2009. Edimburgh.

[14] Nielsen, J.R.; Rindel, J.H.; Mortensen, F.R. “Subjective Evaluation of Noise from Neighbours – With Focus on Low Frequencies”, Pilot project, Publication n. 52, 1998, Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark.

[15] Mortensen, F.R. “Subjective Evaluation of Noise from Neighbours – With Focus on Low Frequencies”, Main project, Publication n. 53, 1999, Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark.

# ABSORCIÓN ACÚSTICA DE MATERIALES TEXTILES EN RECINTOS DE CULTO

**PACS**: 43.55.Ev

Álvarez-Morales, L.[1]; Alonso, A.[1]; Girón, S.[1]; Galindo, M.[1]; Suárez, R.[1]; Sendra, J.J.[1]; Giménez, A.[2]

[1]Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, Tel: +34954555979, Fax: +34954557892; e-mails:calvarez6@us.es; aliciaalonso@us.es; sgiron@us.es; mgalindo@us.es; rsuarez@us.es; jsendra@us.es

[2]Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 - Valencia, Tel: +34 963877000, ext: 85240;e-mail: agimenez@fis.upv.es

## ABSTRACT

For the great festivities, worship venues are mainly decorated by incorporating textiles, ephemeral solutions which change the acoustic behaviour of these spaces. The aim of this work is the acoustical characterisation of some of these textile decorations by measuring in situ their absorption coefficient, considering different configurations. Two commercial measuring tools have been used in order to determine the absorption coefficient. These systems are based on two calculation methods: subtraction technique and the measurement of both sound pressure and velocity particles.

## RESUMEN

Los recintos eclesiales se ornamentan para las grandes festividades principalmente mediante la incorporación de materiales textiles, soluciones efímeras que pueden modificar el comportamiento acústico de estos espacios. El objetivo de este trabajo es caracterizar acústicamente algunas de estas decoraciones textiles, mediante la medición in situ de su coeficiente de absorción, adoptando diferentes configuraciones. Se han usado dos equipos comerciales de medida que permiten determinar el coeficiente de absorción. Estos equipos se basan en dos métodos de cálculo: técnica de sustracción, y la medida de la presión sonora y la velocidad de las partículas.

## INTRODUCCIÓN

Los recintos de culto de grandes dimensiones suelen tener elevados tiempos de reverberación [1-3] debido a una escasez de absorción de los materiales que los conforman, especialmente a bajas y medias frecuencias. El marcado carácter patrimonial de estos espacios dificulta la posibilidad de intervenir acústicamente sobre ellos, limitándose prácticamente a la búsqueda de soluciones efímeras que aparecen asociadas con frecuencia a diferentes actividades, ritos y festividades religiosas [4].




**Figura 1.** (a) Vista interior de la iglesia de la Anunciación. Diferentes textiles usados en la Catedral de Sevilla: (b) Altar de plata con dosel posterior de terciopelo; (c) disposición de textil pesado sobre columna; y (d) cortina pesada a la entrada de la Capilla Real.

Dentro de la arquitectura efímera, históricamente uno de los recursos más habituales es la utilización de elementos textiles [5], que estratégicamente colocados, desde un punto de vista acústico, y en función de su densidad y disposición, pueden ayudar a reducir el exceso de reverberación. Estos elementos frecuentemente se disponen en arcos y capillas con objeto de segregar estos espacios del espacio principal o sobre columnas y paredes con diferentes grados de fruncido. Además, en las iglesias católicas, muchos de estos textiles son pintados y enmarcados a modo de lienzos con temas de carácter religioso (Figura 1).

Una de las principales dificultades es asignar los coeficientes de absorción de estos elementos textiles, existiendo un importante vacío en la literatura científica debido al desconocimiento de las características acústicas de estos materiales en un recinto eclesial. El objetivo del presente trabajo es caracterizar algunos de estos elementos textiles de uso frecuente en las iglesias mediante el cálculo de su coeficiente de absorción a partir de medidas in situ.

## MONTAJE EXPERIMENTAL



**Figura 2.** Sonda Zircon (derecha) y sonda de impedancia (izquierda).

Las medidas se realizaron usando dos equipos de medida in situ (Figura 2). El primero corresponde a la sonda Zircon (SZ) [6], formada por un altavoz y un micrófono separados una distancia constante (1,25 m). La sonda utiliza la técnica de sustracción de Mommertz [7] y enventanado [8]. Necesita dos señales: la respuesta impulsiva en campo libre y la respuesta impulsiva registrada in situ con el micrófono situado cerca de la muestra (25 cm). La respuesta en campo libre se sustrae de la respuesta in situ, cancelando así la contribución del sonido directo. Las reflexiones indeseadas se eliminan de la respuesta impulsiva aplicando ventanas temporales que aíslan la primera reflexión, permitiendo estimar el coeficiente de reflexión de la muestra, a partir del cual se deduce el de absorción. Este equipo permite evaluar el coeficiente de absorción a diferentes ángulos de incidencia sonora. El segundo equipo corresponde a una sonda de impedancia (SPU) [9] que permite estimar la intensidad, la impedancia, el coeficiente de reflexión y de absorción de un material, aplicando varios métodos de cálculo: *mirror source method*, *plane wave surface impedance method* o *intensity extrapolation method*. En este caso se ha optado por el método *mirror source*, ya que sus resultados no se ven afectados por los efectos de las reflexiones en una sala reverberante [10]. Al igual que la sonda Zircon, la sonda SPU está formada por un altavoz y un sensor separados

una distancia constante (26 cm) que permite medir la presión y velocidad de las partículas de aire cerca de la muestra (5 mm).También se necesita una señal de referencia en campo libre. En ambos casos se ha optado por considerar una incidencia normal a la muestra. Ambos equipos se controlan mediante un software (Dirac 5 para la SZ; propio para la SPU) instalado a un ordenador portátil que funcionan como generador y analizador de señal, conectado a las sondas vía USB pasando por sendas tarjetas de sonido: USB Audio interface + amplificador de potencia B&K 2734 para SZ; amplificador MFDAQ-2 y un acondicionador de señal MFSC-2 de Microflown para la SPU.

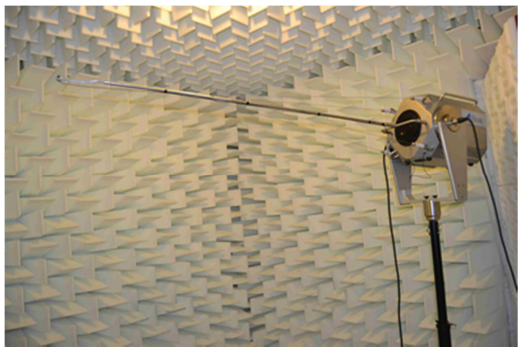


**Figura 3.** Medida del sonido directo para la calibración de la sonda Zircon.

Los ensayos se realizaron en la iglesia de la Anunciación de Sevilla (Figura 1 (a)), siguiendo la metodología recomendada para cada equipo [11-14]. Las señales de excitación utilizadas son una señal de barrido exponencial en frecuencia para la SZ y ruido blanco para la SPU. Se controlaron las condiciones de temperatura y humedad relativa para el correcto cálculo de la distancia emisor-receptor. Para la señal de campo libre en la SZ se realizaron medidas en cámara anecoica (Figura 3), para la SPU se tomaron al inicio de cada sesión de medida. Se han analizado tres tipos diferentes de textiles, correspondientes a un tipo de terciopelo ligero (T) de 320 g/m$^2$, un damasco bordado (DA) de 227 g/m$^2$y un lienzo de algodón (Li).

Los dos primeros textiles, se colgaron sobre una estructura móvil que permite el montaje en dos configuraciones: drapeado y liso (Figura 4(a) y (b)). Además, para comparar diferentes disposiciones, se han ensayado varias distancias de separación entre el textil y la pared de la iglesia, que corresponde a un muro de fábrica de ladrillo, enlucido y pintado. El lienzo de algodón es una pintura al óleo (siglo XVIII) de carácter religioso, de unos 9 m$^2$, ubicado en una pared lateral de la iglesia y dispuesta sobre un marco de madera que deja una cámara de aire de unos 5 cm con la pared (Figura 4(c)).

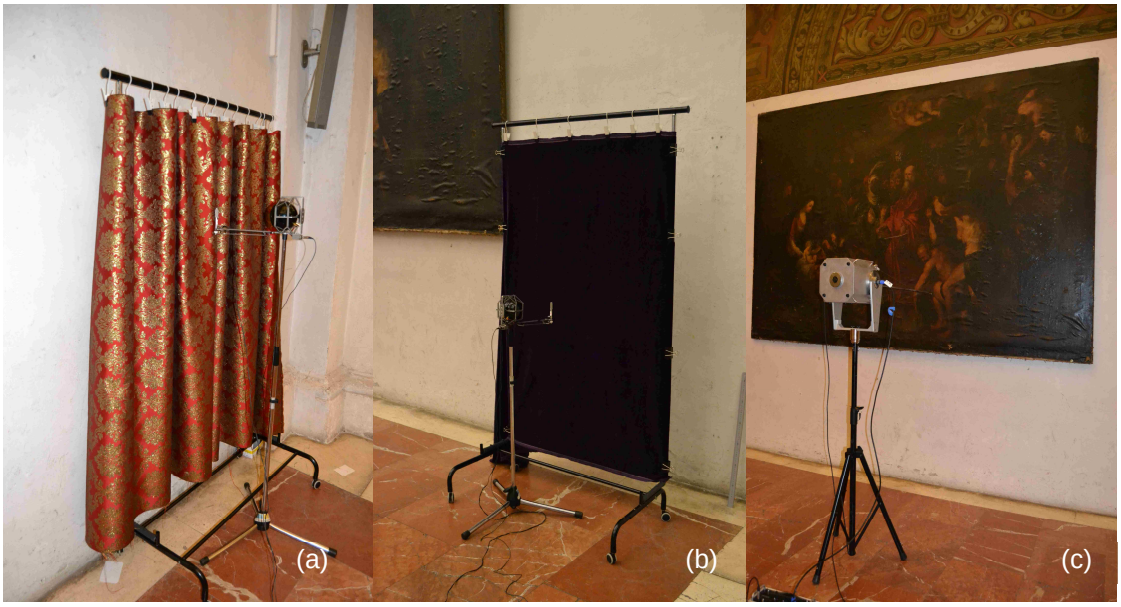



**Figura 4.** Textiles caracterizados: Damasco bordado dispuesto de forma drapeada (a), terciopelo ligero dispuesto de forma lisa (b) y lienzo (c).

**RESULTADOS**

Se han llevado a cabo diversas campañas de medición sobre varios de los elementos decorativos que habitualmente se encuentran en el interior de los espacios eclesiales. La utilización de los dos equipos comerciales ha permitido calcular los coeficientes de absorción, bajo incidencia normal, de estos materiales en función de la configuración adoptada.

Ambos equipos presentan problemas de campo cercano, pues los rangos de trabajo propuestos por los fabricantes son fiables a partir de 200-250 Hz para la SZ y 300 Hz para la SPU. Las características del montaje obligaron a que la altura de la SZ no estuviera suficientemente alejada del suelo, permitiendo que puedan recogerse reflexiones no deseadas. Además, el tamaño de las muestras estaba más comprometido para la SZ, especialmente considerando el ancho, lo que puede introducir efectos de borde. Aunque lo ideal sería comparar los resultados obtenidos con valores contrastados de diversas fuentes y bases de datos, las disponibles no son lo suficientemente explícitas como para señalar conjuntamente el material, su densidad, su disposición lisa o drapeada, el porcentaje de superficie drapeada y la distancia de la muestra a la pared. El terciopelo, aunque ha sido ensayado con más profusión, tampoco ha sido debidamente explicitado en todos los términos anteriormente descritos, si bien es cierto que los valores presentados en forma lisa son notablemente menores a los encontrados en nuestros ensayos.

En la Figura 5 se presentan los valores del coeficiente de absorción, por bandas de octava, medidos con ambos dispositivos para el damasco bordado (DA), instalado de forma lisa (L), y colocado a distintas distancias con respecto a la pared. Para cada material, se representa el valor promedio del coeficiente de absorción medido en varios puntos seleccionados para cubrir correctamente la superficie de la muestra. La variación media entre los puntos de medida del "mallado" es del 3%, siendo inferior al 5% para todas las configuraciones a todas las bandas de frecuencia (los valores más altos en la banda de 125 Hz). Se observa una cierta disparidad entre ambos grupos de resultados, numéricos y de tendencia, especialmente cuando la muestra está muy cerca de la pared o cuando está muy lejos. Ésta es especialmente significativa a bajas frecuencias, bandas en las que los valores del coeficiente de absorción medido con una y otra sonda difieren más del 20%. A medida que aumenta la frecuencia y entramos en el rango adecuado de funcionamiento, los resultados se estabilizan para ambos equipos a medias y altas frecuencias, alcanzando valores entre 0,60 y 1,00 en todas las disposiciones. No obstante, a nivel general los valores de la SZ son menores (aproximadamente un 15%) que los obtenidos con la SPU. Esta sonda, la SPU, será la que utilizaremos para el resto de medidas a raíz de los posibles inconvenientes descritos para la SZ.

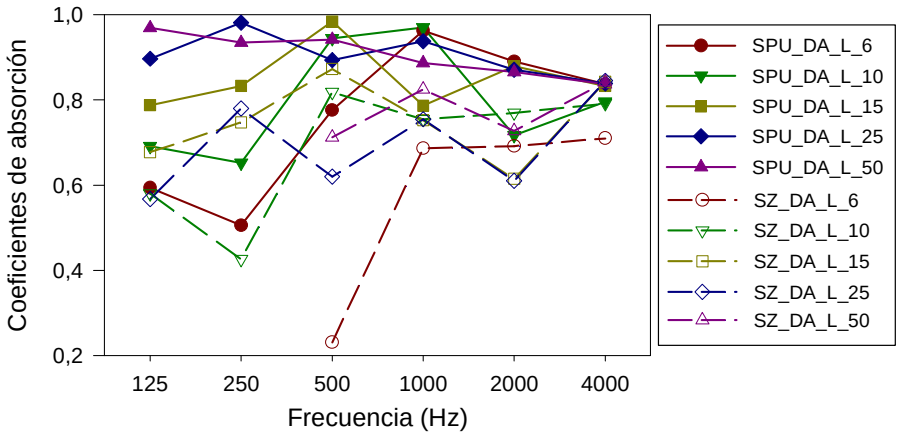



**Figura 5**. Coeficientes de absorción en bandas de octava obtenidos al medir con la sonda de impedancia (SPU) y la sonda Zircon (SZ) el damasco bordado (DA), instalado de forma lisa (L) y colocado a diferentes distancias con respecto a la pared (6, 10, 15, 25 y 50 cm).

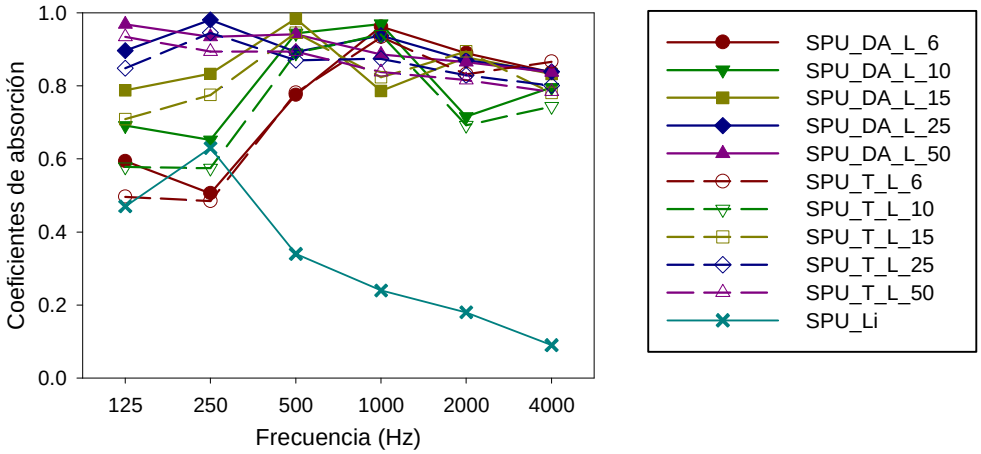



**Figura 6**. Coeficientes de absorción en bandas de octava obtenidos al medir con la sonda de impedancia (SPU) el damasco bordado (DA), el terciopelo (T) instalados de forma lisa (L) y colocados a diferentes distancias con respecto a la pared, y el lienzo de algodón (Li).

Además, la presencia de superficies reflectantes distantes más de 8 cm de la SPU no interfiere con los resultados [10].

Prestando atención a los resultados obtenidos con la SPU, se representan en la Figura 6 los valores de los coeficientes de absorción obtenidos para el damasco bordado (DA) y el terciopelo (T) en su configuración lisa (L) a varias distancias de la pared, así como los obtenidos para el lienzo (Li). Observamos que el comportamiento de los dos textiles es similar. A medida que aumenta la separación del textil con respecto a la pared, es decir, la cámara de aire detrás del material, aumenta la absorción a bajas frecuencias, mientras que a medias-altas frecuencias se reduce la influencia de la cámara de aire, dando lugar a valores más uniformes. Cabe destacar, que cuando la cámara de aire entre el textil y la pared supera los 25 cm, se obtiene un coeficiente de absorción uniforme superior a 0,8. El lienzo muestra un comportamiento completamente opuesto, ofreciendo la máxima absorción a bajas frecuencias, al actuar como un resonador. En general, a la hora de valorar la influencia de la tipología del material, se obtiene menor absorción para el material de mayor densidad (terciopelo) con respecto al de menor (damasco bordado). La existencia de bordados en toda la superficie duplica las capas del tejido pudiendo aumentar su absorción.

A continuación, analizamos ambos textiles en la configuración drapeada, que corresponde a un 50% de su superficie. Aquí, cobra importancia la colocación de la sonda SPU, que mantiene el micrófono receptor a una distancia de 5 mm de la muestra, de forma que unas veces se enfrenta a salientes y otras a entrantes del material. En primer lugar se plantea un valor promedio de todas las medidas, sin embargo los valores obtenidos no permiten inferir ningún resultado claro, pues los coeficientes de absorción no se corresponden con el comportamiento teórico esperado, ya que su absorción debería ser mayor dada la relación entre el área efectivamente ocupada por la cortina y el área de la cortina estirada, que puede dar lugar a incrementos en el coeficiente de absorción incluso de un 50% [15-16]. Sin embargo, para algunas bandas de frecuencia no solo no queda reflejado este incremento, sino que los coeficientes obtenidos con el material fruncido son menores que los obtenidos con el material estirado. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 7 los resultados de las diferencias del coeficiente de absorción por bandas de octava, obtenidas para el terciopelo (en donde los valores negativos corresponden a incremento de absorción con la configuración drapeada). Esto lleva a concluir que la técnica de medición utilizada con la sonda SPU parece que no es adecuada para caracterizar materiales plegados si el objetivo es presentar valores del coeficiente de absorción del material al completo.

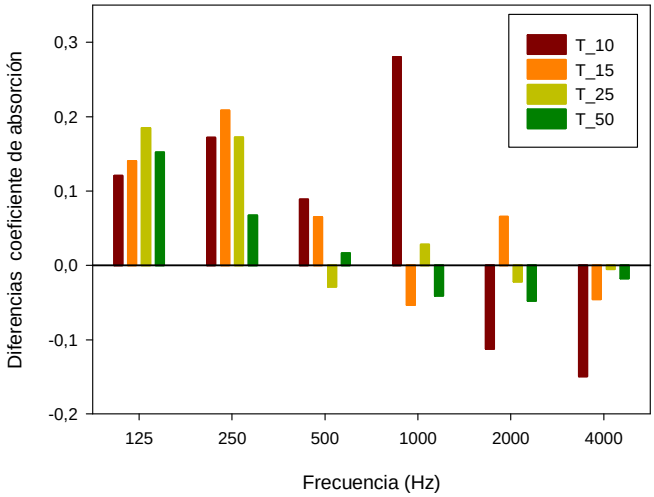



**Figura 7.** Diferencias obtenidas entre los valores promedio de los coeficientes de absorción medidos con la sonda de intensidad (SPU) para el terciopelo (T) en configuración lisa y drapeada, a varias distancias de la pared.

Por último, se analiza la importancia de las medidas realizadas sobre los salientes y entrantes de cada textil. En la Figura 8(a-b) se muestra el coeficiente de absorción frente a la frecuencia para el DA y T diferenciando las medidas localizadas tanto en entrantes como en salientes. Tal como se podía predecir, se observa un notable contraste entre ambos grupos de puntos, un hecho claramente justificado por las condiciones de cada ubicación, donde la llegada de reflexiones sonoras y la creación de cámaras de aire varían de un caso a otro. Cabe destacar la máxima disparidad cuando la estructura que sustenta el tejido se dispone a 10 y 15 cm de la pared. En el caso de que la cámara sea de 50 cm, dichas variaciones no se perciben (inferiores al 5%), dado que no existe superficie rígida tras el textil en ninguno de los casos.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo un estudio de caracterización acústica de diferentes tipos de textiles utilizados en la decoración festiva de espacios eclesiales, a partir de la obtención de los coeficientes de absorción in situ. Para ello, se han utilizado dos equipos comerciales de medición que se basan en distintas técnicas y métodos de cálculo: la sonda Zircon y la sonda de impedancia.

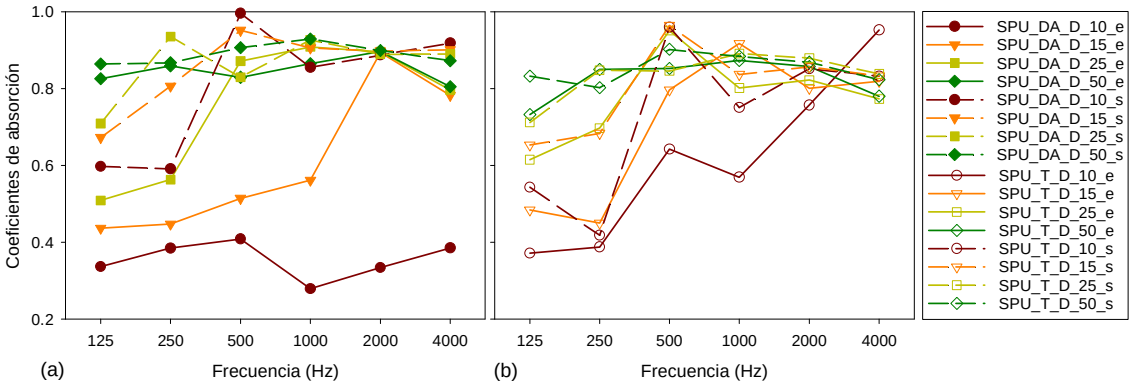



**Figura 8.** Coeficientes de absorción obtenidos para cada textil; (a) damasco bordado (DA) y (b) terciopelo (T), en la configuración drapeada (D), considerando separadamente entrantes (Línea continua, e) y salientes (Línea discontinua, s).

El análisis de los resultados refleja cierta disparidad entre los valores obtenidos por ambos equipos, especialmente a bajas frecuencias, fuera del rango adecuado de funcionamiento. A nivel general, los valores obtenidos con la sonda Zircon son menores que los obtenidos con la sonda de impedancia, sin embargo, las condiciones de medición no se adaptan a las recomendadas por el fabricante de la sonsa Zircon, dadas las características de montaje y existencia de superficies reflectantes.

Por otra parte, cuando los materiales se disponen de forma lisa, a medida que se incrementa la cámara de aire, la absorción de ambos materiales aumenta a bajas frecuencias, mientras que a medias-altas frecuencias se mantiene uniforme con valores de absorción superiores a 0.8.

A la hora de valorar la influencia de la tipología del material, se obtiene menor absorción para el material de mayor densidad (terciopelo) con respecto al de menor (damasco bordado). La existencia de bordados en toda la superficie duplica las capas del tejido pudiendo aumentar su absorción.

Finalmente, cuando el material se dispone de forma drapeada surge la necesidad de crear un mallado de puntos sobre el material con el fin de analizar la influencia de los entrantes y salientes del tejido. Tras la valoración de los resultados se observa un claro contraste entre ambos grupos de puntos, justificado por las condiciones individuales creadas para cada uno, dada la existencia de reflexiones y la cámara de aire. El promedio de los valores refleja disparidad entre los resultados obtenidos y el comportamiento teórico esperado, con lo cual, ante la imposibilidad de medir el material en su conjunto, se concluye que el equipo no es el adecuado para la caracterización de materiales drapeados.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo quieren agradecer a Diego Marín, técnico del CICUS de la Universidad de Sevilla, las facilidades brindadas para la realización de las medidas en la iglesia de la Anunciación**.** También agradecen al grupo de acústica virtual de la UP de Valencia el préstamo del equipo de medida. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de referencias CEI 2014/731 y BIA2014-56755-P.

## REFERENCIAS

[1] Lewers T.H., Anderson J. Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. J Sound Vib, 92 (2), 1984, pp. 285-297.
[2] Magrini A., Ricciardi P. An experimental study of acoustical parameters in churches. Int J Acoust Vib, 7, 2002, pp. 177-83.
[3] Álvarez, L.,Galindo M., Girón S., Zamarreño T. La acústica de las Catedrales Andaluzas. Proceedings of Tecniacústica2013, pp. 901-908.
[4] Alonso A., Suárez R., Sendra J.J., Zamarreño T. Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. J Build Perfom Sim, 7(5), 2014, pp. 360-378.
[5] Martellotta F., Castiglione M.L. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. Proceedings of the Forum Acusticum 2011.
[6] http://www.acoustics-engineering.com/html/zircon.html.(Visitada 15/07/2015)
[7] Mommertz E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. ApplAcoust, 46, 1995, pp. 251-263.
[8] Guidorzi P., Garai M. Signal analysis in the sound absorption measurement procedure: the importance of time subtraction and reference surface corrections. In: Proceedings of Acoustics 2008 Paris, pp. 1755–1760.
[9] http://www.microflown.com/products/solutions/in-situ-absorption-setup.html.(Visitada 15/07/2015)

[10] http://www.microflown.com/files/media/library/books/microflown_ebook/ebook_6_impedance.pdf (Visitada 15/07/2015)
[11] Praticòa F.G., Vaianab R., Fedelea R. A study on the dependence of PEMs acousticproperties on incidence angle. IntJPavEng, 2014. DOI: 10.1080/10298436.2014.943215
[12] Haugen S. Master thesis: Sound Reflection from Building Facades. Department of Electronics and Telecommunications. Norwegian University of Science and Technology, 2013.
[13] Cats P., Tijs E., Comesana D.F. Exploration of the differences between a pressure-velocity based in situ absorption measurement method and the standardized reverberant room method. Proceeding of Meeting of Acoustics ICA 2013.
[14] Pérez-Vidal C., Cerdá S., Montell R., Cibrián R., Segura J.; Barba A., Querol L., Giménez A. Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad. Proceedings of TecniAcustica Valladolid 2013, pp. 1366- 374.
[15] Cox T.J., D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application. 2nd ed. Abingdon, Oxfordshire: Taylor & Francis, 2009.
[16] Vorländer: M. Auralizacion, fundamentals of acoustics modeling simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ARQUITETURA, ACÚSTICA E LITURGIA: AVALIAÇÃO E PROPOSTA ACÚSTICA DA CONCATEDRAL NOSSA SENHORA DO BOM CONSELHO EM ARAPIRACA-AL

PACS: 43.55.Gx

Elizabeth de A. C. Duarte; Camilla C. Alécio
Grupo de Pesquisa Qualidade do Projeto de Arquitetura e Urbanismo – Q-ARA.
Instituição: Universidade Federal de Alagoas.
Endereço da Rua: Manoel Severino Barbosa
CEP:57309-005
País: Brasil
Tel: +82. 3482-1840
E-Mail: eacduarte@yahoo.com.br; camilla_alecio@hotmail.com

## ABSTRACT

In the liturgical of the Catholic Church, speech and music make up the main activities , making the essential acoustic quality. Generally, the Catholic churches have poor intelligibility and high sound, becoming a noisy source. The study evaluates the acoustics of Concatedral Our Lady of Good Counsel in Arapiraca- AL, proposing an acoustic adaptation. The methodology was divided into: Distribution Analysis of the sound rays, reverberation time calculation, evaluating the sound insulation, the distribution of artificial sound, electroacoustic installed power, the acoustic perception of users and an acoustic correction proposal. As a result could be a good acoustic performance in Concatedral.

## RESUMO

Na litúrgica da Igreja Católica, fala e música compõem as principais atividades, tornando a qualidade acústica essencial. Geralmente, as igrejas católicas apresentam má inteligibilidade e alta sonorização, tornando-se uma fonte ruidosa. O trabalho avalia as condições acústicas da Concatedral Nossa Senhora do Bom Conselho, em Arapiraca- AL, propondo uma adequação acústica. A metodologia foi dividida em: análise da distribuição dos raios sonoros, cálculo do tempo de reverberação, avaliando o isolamento sonoro, a distribuição da sonorização artificial, a potência eletroacústica instalada, a percepção acústica dos usuários e uma proposta de correção acústica. Como resultado conseguiu-se um bom desempenho acústico na Concatedral.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento das cidades, o ruído é considerado um dos maiores problemas na vida moderna, podendo causar inúmeros problemas ao ser humano, desde físicos, psicológicos e materiais. Em recintos fechados, a qualidade acústica dependerá do atendimento aos seguintes requisitos: inteligibilidade do som, ausência de interferência de ruídos externos sobre o som de interesse, distribuição sonora uniforme, difusão sonora e tempo de reverberação adequado (SOUZA, 2009). Dependendo da função que um ambiente possua, existem condições estabelecidas em normas e legislações que buscam propiciar um melhor desempenho das atividades nesses ambientes.

As igrejas são edificações significativas na sociedade, sendo importante que sejam adequadamente analisados os dispositivos ou soluções mais apropriadas para promover a melhor inteligibilidade da comunicação no seu interior. Os templos católicos têm como objeto específico passar uma crença em que a divindade se faz presente pela reunião dos fiéis e pela força da Palavra, na forma de cânticos e leitura das escrituras sagradas (CAAS, 2005). De

acordo com Barbo (2008), as exigências quanto às qualidades acústicas em ambientes de igreja abrangem a combinação de parâmetros relacionados diretamente à fala e à música. Nas últimas décadas, a igreja católica promoveu mudanças nas celebrações deixando de serem feitas em latim, passando para a língua local e ainda incorporaram músicas congregacionais com a inserção de vários instrumentos acústicos e eletroacústicos. Essas modificações alteraram os costumes e consequentemente o uso destes ambientes.

Entre os principais problemas acústicos de templos religiosos está a baixa inteligibilidade por parte dos ouvintes. Isso ocorre por falta de adequação do espaço arquitetônico, pois estes recintos permanecem inalterados ao longo do tempo, e mesmo com a mudança da liturgia, não há transformação nesse espaço. Outro problema está relacionado com a interferência dos ruídos externos sofridos por estes recintos, já que a maioria dos templos está localizada em vias de tráfego intenso de veículos. Com esses agravantes, os templos, em sua maioria, recorrem a aparelhos eletroacústicos, de reforço sonoro. Segundo Nascimento (2012), o uso dos equipamentos eletroacústicos nas igrejas é visto como uma forma de auxiliar na resolução destes problemas, diretamente ligados à inteligibilidade da palavra seja cantada ou falada. Mas quando não há o cuidado na distribuição, instalação e utilização dos equipamentos eletroacústicos, eles se tornam fontes de ruídos internos sendo a causa de desconforto acústico nos fiéis.

Dentro desse contexto, este trabalho avalia as condições acústicas da Concatedral de Nossa Senhora do Bom Conselho em Arapiraca-AL, mostrada na Figura 1, para se obter as condições ideais de funcionamento e, logo após, sugerir uma proposta de correção acústica.

A) B)



Figura 1 – Vista da Concatedral Nossa Senhora do Bom Conselho: (A) externa; (B) interna.

## 2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo avaliar as condições acústicas da Concatedral Nossa Senhora do Bom Conselho, situada no município de Arapiraca - AL, observando a relação entre a opinião do usuário, o desempenho acústico e eletroacústico, com finalidade de propor uma adequação acústica para recinto.

## 3. MÉTODO

Este trabalho foi realizado em oito etapas, mostradas a seguir:

**Etapa 1- Caracterização do objeto de estudo:** O critério de escolha utilizado para a seleção da Concatedral foi seu valor patrimonial, construída em 1952 é maior igreja católica do município. A igreja tem capacidade para 600 pessoas sentadas, com área total construída de 1102,23 m², pé-direito de 9 m e volume de 10.086 m³. Ela está situada na principal praça no centro da cidade, onde parte do comércio da cidade acontece, como mostra a Figura 2.




Figura 2 – Vista Superior-Inserção da igreja no centro da cidade (SEPLAM, 2011).

**Etapa 2- Distribuição dos raios sonoros:** Para analisar a distribuição dos som no ambiente, foram traçados manualmente os raios sonoros simulando o som direto e refletido em distintos pontos da igreja, a fim de detectar possíveis erros de projeto que seriam decorrentes da geometria da igreja.

**Etapa 3- Cálculos do tempo de reverberação (Tr):** Foi utilizada a fórmula de Sabine, para isso foi necessário o levantamento de todos os materiais de revestimento que compõem a parte interna da igreja, junto com sua área e coeficientes de absorção nas frequências 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

**Etapa 4- Avaliação do isolamento acústico:** Para a estimativa do isolamento acústico da igreja na frequência de 500 Hz, foi utilizada a equação descrita por Carvalho (2010) para obter a transmissividade média (τm) mostrada na Equação 1 que, em seguida, foi aplicada na Equação 2 para se chegar ao nível de redução de ruído (RR):

$$\tau_m = \frac{\sum\left[S \cdot \left(\frac{1}{10^{IA/10}}\right)\right]}{\sum S} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
$\tau_m$ é a transmissividade média [dB/m²];
IA é o nível de isolamento acústico [dB];
S é a área de contato do material [m²].

$$\mathrm{RR} = 10 \log \cdot (1/\tau_m) \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
RR é o nível de redução de ruído [dB];
$\tau_m$ é a transmissividade média[dB/m²].

Para os cálculos, antes, fez-se necessário conhecer o nível de redução de ruído (RR). Deste modo, foram feitas medições *in loco* com o medidor de nível de pressão sonora (HDB 900), emprestado pelo 3º Batalhão de Polícia Militar do Agreste Alagoano. As medições ocorreram em dois momentos: durante o dia com a realização da missa, durante o dia sem a realização da missa. Foram medidos 4 pontos demonstrados na Figura 3, o altar, o centro, o fundo da igreja e a área externa.




Figura 3 – Pontos de medição (GOOGLE Earth-Maps, 2014).

**Etapa 5- Distribuição da sonorização artificial no ambiente:** Para a avaliação do sistema de reforços acústicos, foi analisada a localização e a distribuição sonora dos equipamentos eletroacústicos. Par isso foi feito uma representação gráfica do percurso sonoro emitido pelas caixas acústicas no ambiente, levando em consideração as informações técnicas do ângulo de propagação sonora das caixas acústicas, disponibilizadas pelo fabricante, seguindo o modelo do trabalho feito por Oliveira (2013) e Cunha (2014).

**Etapa 6- Potência eletroacústica:** Segundo Nascimento (2012), a arquitetura das igrejas católicas não foi projetada para receber um sistema de captação, amplificação e projeção sonora. Os modelos tradicionais de caixas acústicas quando instalados em ambientes com

problemas de ordem acústica apresentam como resultado a insatisfação para o instalador e para os usuários. Para a avaliação da potência eletroacústica, Silva (2011) apresenta uma forma de se fazer uma estimativa, segundo o autor, sem grande margem de erro, que foi utilizada no cálculo da potência sonora da Concatedral, mostrado na Equação 3.

$$P = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{p}^2}{300 \cdot \mathrm{t}}$$

Equação 3

Onde:
P é a potência elétrica necessária a ser instalada na sala, em Watt [W];
V é o volume [m³];
t é o tempo de reverberação do local [s];
p é a pressão acústica desejada [μ bar]. As pressões recomendadas em espaços fechados são: Sala com música leve (igrejas), restaurantes = 8 μ bar.

**Etapa 7- Avaliação acústica do usuário:** Para detectar a interpretação do usuário sobre as condições da acústica do recinto, foram aplicados questionários para os frequentadores da missa e para a equipe de liturgia. Os questionários aplicados aos frequentadores da missa se deram de maneira aleatória, em diferentes postos dentro da igreja e após a missa. Também foram aplicados questionários aos executores da missa, o padre, os músicos, os comentaristas e a equipe técnica responsável pela sonorização da igreja.

**Etapa 8- Proposta de adequação acústica:** Após análise, foram obtidas as condições de funcionamento, possibilitando detectar o comportamento acústico, para se sugerir uma proposta de adequação acústica. Essa proposta acústica tem como critério principal proporcionar uma boa qualidade acústica dentro do recinto sem interferir nos fatores culturais e históricos da igreja.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados da avaliação de projeto arquitetônico, cálculo de predição e avaliação do nível de satisfação acústica do usuário.

### 4.1. Avaliação da distribuição dos raios sonoros

Pela análise da propagação dos raios sonoros traçados, demonstrados na Figura 4, em planta baixa e corte transversal, foi observado que há muitos raios que são refletidos e não são direcionados ao público. No corte, a partir da metade da igreja, o raio sonoro refletido já não atinge os ouvintes. Alguns raios aparecem agrupados nos fundos e no centro da igreja, pois sua forma côncava colabora para que isso aconteça. Os principais problemas com as reflexões dos raios sonoros são provenientes da forma das paredes do fundo e do teto plano.

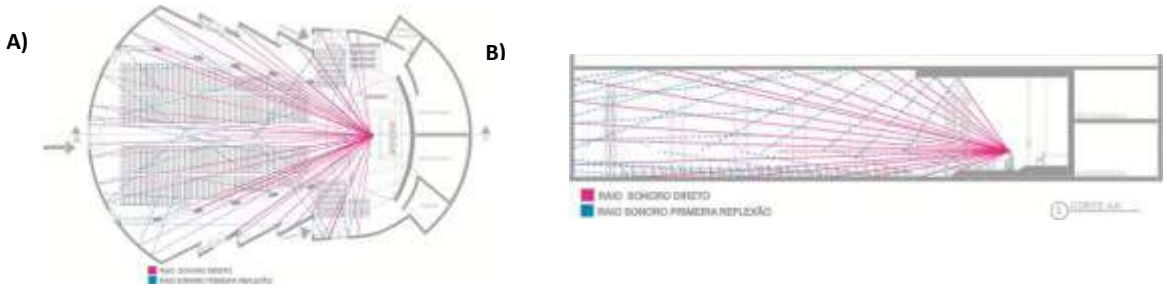



Figura 4 – Distribuição dos raios sonoros da Concatedral: (A) planta baixa; (B) Corte transversal.

### 4.2. Avaliação do tempo de reverberação

O cálculo do tempo de reverberação da Concatedral está representado na Figura 5. Observa-se que o Tr excede largamente os valores ideais para este tipo de espaço. Segundo a NBR 12179, os valores recomendados para assegurar uma boa inteligibilidade da palavra em igreja católica situam-se entre 2,0 e 2,8 segundos (s), porém neste espaço verificou-se um

valor total do Tr entre 3,0 e 8,0 s nas frequências centrais entre 125 Hz e 4000 Hz, sendo um valor elevado para a função que a igreja exerce. Constata-se uma considerável diferença entre os valores obtidos para baixas frequências (5s e 7,5s) e os obtidos para altas frequências (atingindo 3s). No entanto, mesmo nas altas frequências, o valor de Tr continua alto quando comparado com os valores ideais. Isso permite concluir que a igreja se apresenta altamente reflexiva, principalmente para o intervalo de frequência de 125 Hz a 1000 Hz, que são os sons graves e médios.

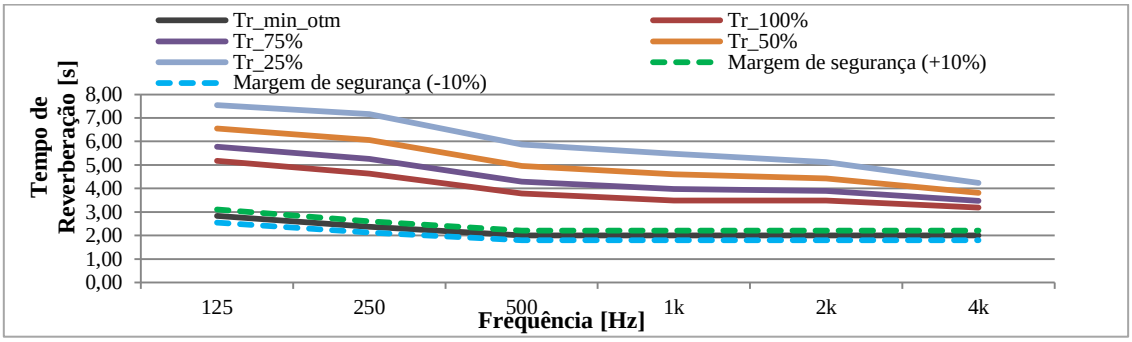



Figura 5– Tempo de reverberação da Concatedral.

## 4.3. Avaliação do isolamento acústico

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NBR 10.152 (1987), o nível de ruído admitido para igrejas e templos (cultos meditativos) é de 40 – 50 dB (A). Observa-se que o nível de pressão sonora dentro da Concatedral durante o culto é elevado, como é mostrado na Tabela 1. Para os dias sem missa, os valores externo e interno são bastante próximos, mostrando a fragilidade do isolamento acústico das partições.

A NBR 10.151(2000), admite para ambientes externos em área mista, com vocação comercial e administrativa, 60 dB (A) no período diurno e 55 dB (A) no período noturno. Logo, observa-se que o nível de ruído na localidade também é elevado, conforme os valores estipulados pela norma. Realizando medições do nível de pressão sonora emitido durante a missa dentro da igreja, chegou-se a valores muito altos, de até 93,5 dB (A) e sem realização de missa dentro da igreja, de 65,2 dB (A).

Tabela 1: Medições do Nível de Pressão Sonora.

| **Medições de nível de pressão sonora (Leq)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | P1: altar | P2: meio da igreja | P3: Final da igreja | Média dentro da igreja | P4: Fora da Igreja (Praça) | NBR 10.152 |
| Dia sem culto | 67,1 dB (A) | 65,3 dB (A) | 63,2 dB (A) | *65,2 dB (A)* | 62,1 dB (A) | 40 – 50 dB (A) |
| Dia com culto | 93,7 dB (A) | 91,6 dB (A) | 95,2 dB (A) | *93,5 dB (A)* | 80,7 dB (A) | |

Verificou-se também que os materiais atualmente utilizados na igreja não ajudam na redução de ruído, que são de aproximadamente 12,8 dB (A), como é mostrado na Tabela 2. Um fator relevante são as janelas e portas que permanecem sempre abertas, mas a questão da tipologia da igreja e o clima quente e seco do agreste alagoano, não permitem uma outra possibilidade, a não ser em poucas fachadas.

Tabela 2: Isolamento acústico médio (500 Hz)

| **Concatedral em condição original- Janelas abertas** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Localização* | *Especificação de material* | *S= Área (m²)* | *IA (dB)* | $\frac{1}{10^{IA/10}}$ | $S \cdot \left(\frac{1}{10^{IA/10}}\right)$ |
| Teto | Laje de concreto armado | 1.102,23 | 50 | 0,00001 | 0,01102 |
| Parede (altar) | Mármore | 154,74 | 50 | 0,00001 | 0,00154 |
| Paredes | Concreto armado pintado | 1.376,61 | 50 | 0,00001 | 0,01376 |
| Janelas | Ferro com vidro | 108,79 | 0 | 1,0000 | 108,7900 |
| Portas | Madeira maciça | 76,66 | 0 | 1,0000 | 76,6600 |
| Porta | Vidro | 1,84 | 0 | 1,0000 | 1,8400 |
| Arcos, vigas e pilares. | Concreto armado pintado | 755,81 | 50 | 0,00001 | 0,00755 |
| | ∑S | 3.576,68 | | $\sum\left[S \cdot \left(\frac{1}{10^{IA/10}}\right)\right]$ | 187,3238 |
| Transmissividade média | | | | | 0,052373 |
| **Redução de Ruído [dB]** | | | | | **12,80** |

Vale salientar que esse cálculo se refere à frequência de 500 Hz, com templo completamente aberto, pois esta é sua condição real de uso. Nesta situação, os níveis máximos de ruído seriam reduzidos a 80,7 dB(A), significando que o nível de ruído ainda está muito acima do estipulado pela norma (55 – 60dB).

### 4.4. Distribuição sonorização artificial no ambiente

Para análise do comportamento atual do som que saem das caixas acústicas, foi elaborada a Figura 6, onde o som é representado pela cor azul. O ângulo de propagação do som das caixas informado pelo fabricante é de 90°, a partir do centro de propagação da mesma.

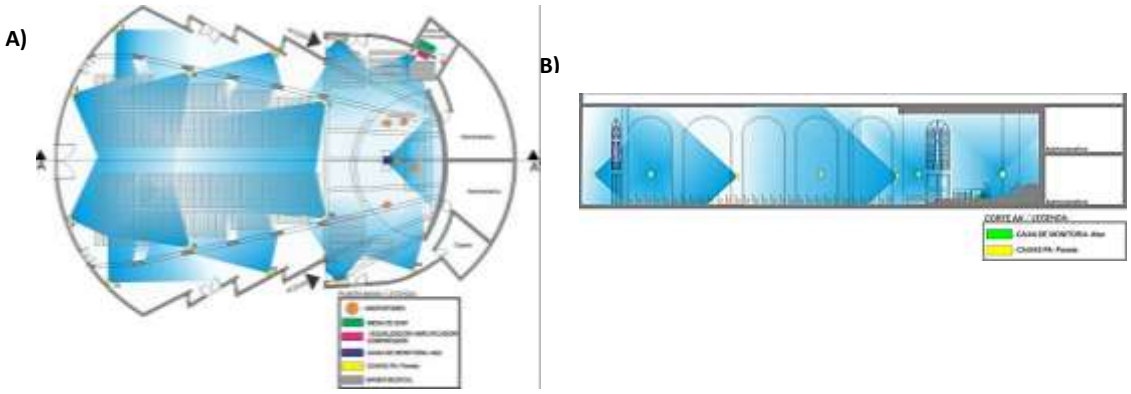



Figura 6 – Distribuição sonorização artificial da Concatedral: (A) planta baixa; (B) Corte tranversal.

A avaliação mostrou que a igreja apresenta alguns erros no projeto eletroacústico. Observou-se que na nave há uma grande concentração de caixas acústicas do tipo P.A., fixadas nas paredes a 2,50 m do chão, que são direcionadas de forma incorreta, contribuindo para alta intensidade sonora neste local. As caixas acústicas não deveriam ser fixas diretamente na parede, pois estas perdem energia sonora para a estrutura onde está fixada. Outro ponto importante é a localização e inclinação das caixas acústicas, estas devem ser inclinadas em direção ao público, ou seja, o som que chega aos ouvidos deve vir de frente ou na diagonal do receptor, nunca por trás, como acontece nas caixas acústicas localizadas na parede dos fundos da nave, mostrada na Figura 6 (A). Além disso, observa-se que há uma grande intensidade sonora, nos fundos da igreja, provocando diversas reflexões que prejudica a inteligibilidade. As caixas de monitoria estão direcionadas de maneira equivocada para o corpo do padre e não para os ouvidos, com é indicado. Outro erro é a localização da mesa de som que fica em uma sala, próxima ao altar, onde o técnico de sonorização não tem a percepção do comportamento sonoro no recinto. Tudo isso contribui para alta intensidade sonora e, também, para a baixa inteligibilidade da igreja.

### 4.5. Potência eletroacústica instalada

O cálculo da potência foi realizado através da uma relação entre a potência eletroacústica e o tempo de reverberação (Equação 1), para a frequência de 500Hz, conforme mostra a Tabela 3. A igreja atualmente está utilizando uma potência de 3.700W, que se refere a aproximadamente três vezes a mais da quantidade indicada com o TR ideal.

Tabela 3: Potência Eletroacústica Instalada.

| **Potência eletroacústica instalada (500Hz)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Ótimo** | **25% de ocupação** | **50% de ocupação** | **75% de ocupação** | **100% de ocupação** |
| TR (s) | 2,0 | 5,29 | 4,95 | 4,64 | 4,37 |
| Potência (W) | 1.076,77 | 406,7 | 434,5 | 470,1 | 492,3 |
| **Potência atual = 3.700 W** | | | | | |

### 4.6. Avaliação acústica do usuário

Foram entrevistados 68 frequentadores após a missa, em sua maioria do sexo feminino (54%) de faixa etária variada. As entrevistas mostram que as pessoas sentem algum desconforto no que se refere à qualidade sonora. Na figura 7, vê-se que a clareza com que as

pessoas entendem o padre e os demais comentaristas é distinta, concentrando-se a maior dificuldade no entendimento da palavra do sacerdote, o que era esperado, pois as pessoas acompanham as músicas e os comentários da equipe litúrgica através do livro de cantos e orações, por esse motivo não sentem necessidade de compreensão apurada das respectivas.

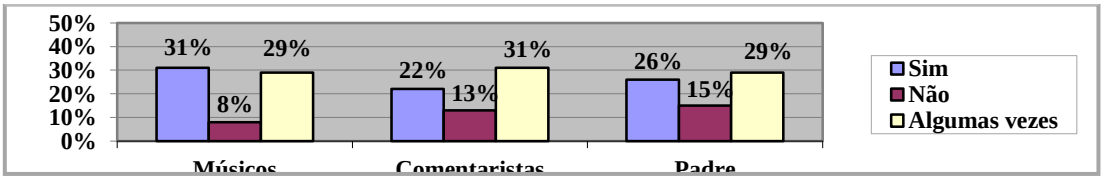



Figura 7: Resultado da pergunta: Ouviu com clareza as palavras proferidas pelo(s):

Nas entrevistas, 34% dos fiéis responderam que preferem se sentar nas primeiras cadeiras, próximo ao altar, sendo a preocupação de entender melhor a palavra que é proferida pela equipe de liturgia um dos fatores apontados pelos frequentadores que levam a esse comportamento.

Na avaliação da equipe de liturgia, foram realizadas entrevistas com os celebrantes (padres, comentaristas e músicos), pois se esperava que esse grupo tivesse um conhecimento maior da problemática, já que convive diretamente com a execução da palavra e da música. Dentre os celebrantes entrevistados, constatou-se que 70% consideraram a qualidade sonora da Concatedral razoável, enquanto 30% identificaram como péssima, havendo relatos de que já receberam reclamações de frequentadores sobre a dificuldade de entendimento da missa. Sendo que todos os entrevistados enfatizaram que a maioria das reclamações sobre o problema acústico da Concatedral era de pessoas que se localizavam nos fundos e no centro da igreja durante a missa, o que foi confirmado na avaliação da distribuição dos raios sonoros e na distribuição sonorização artificial da igreja.

A maioria dos músicos não são profissionais da área, mas apenas devotos que colaboram com as celebrações. Um dos entrevistados da equipe dos celebrantes classificou a qualidade sonora da igreja como *Péssima*. Vale salientar que se trata de profissional que trabalha com equipamentos sonoros da Concatedral e o mesmo disse que o problema não está na qualidade dos equipamentos de som e sim na estrutura física da igreja.

Percebeu-se que alguns frequentadores não emitiram uma opinião mais crítica na avaliação acústica do recinto por respeito ao que a edificação representa. No entanto, não houve esta preocupação vindo da equipe de liturgia, eles relataram o grande problema acústico que a igreja vem sofrendo, o qual foi comprovado na avaliação acústica da igreja.

## 5. PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO ACÚSTICA

A proposta de adequação acústica está apresentada em dois momentos: primeiramente é mostrada a correção das condicionantes acústicas e, logo após, a correção eletroacústica do recinto.

### 5.1. Correção do condicionamento acústico

Para a adequação no condicionamento acústico da Concatedral buscou-se atuar nos elementos e revestimentos interiores do ambiente, alterando a absorção sonora e intervindo na difusão acústica.

Como alternativa para melhor condicionamento acústico da igreja, sugeriu-se a inclusão de materiais com características absorventes mais eficientes para a igreja, em busca de um bom tempo de reverberação. Como proposta, para o piso foi indicada a utilização de carpete de 6mm para a área de maior circulação interna no templo. Além de absorver o som, esta alternativa também favorece a diminuição dos níveis de ruído de impacto ocasionado pelo tráfego de pessoas no ambiente durante a celebração da missa. Também foi indicado trocar os bancos de madeira maciça da igreja por bancos com assento e encosto munidos de estofamento poroso e espesso, ao contrário dos utilizados atualmente, esses bancos apresentam bons índices de absorção sonora.

Para aumentar a absorção, foi proposto nas paredes da nave até 2,10m do chão o painel modular com lã de vidro revestido de tecido na face aparente e bordas, de aplicação modular. Para melhorar a absorção sonora também foi sugerido acrescentar nas paredes da

igreja 6 painéis modulares de 2,50 x 2,00m, sendo posicionados a 3,15m do chão. No teto da nave, recomendou-se a utilização do forro com lã de vidro, fixado na laje, para evitar a grande reflexão de raios provinda do teto reflexivo.

Como foi mostrado anteriormente, no estudo da distribuição dos raios sonoros, a Concatedral tem em suas paredes a forma e materiais muito reflexivos ajudam a concentrar o som nos fundos da igreja, dificultando a inteligibilidade dentro do recinto. Para solucionar este problema, foi sugerido acrescentar o carpete na parede côncava do fundo da Concatedral. Para ajudar difusão sonora da nave, recomendou-se chanfrar o teto no final da nave com gesso acartonado de 12,5mm, em um ângulo de 42º, para que o som seja melhor direcionado para o ouvinte que fica nos fundos da igreja.

Para melhor distribuição de som no altar, sugeriu-se aplicar difusores em madeira laqueada PRD (*Primitive Root Diffusor*), nas duas paredes laterais do altar, para que o som emitido pelo padre seja melhor aproveitado pelos os músicos e o coral. No teto do altar, sugeriu-se rebaixar gradualmente o pé-direito, em alturas variadas, começando a inclinação a partir de 3 metros, com gesso acartonado de 12,5mm, para melhor distribuição de som para a nave. As alterações sugeridas na Concatedral são mostradas nas simulações em 3D nas Figuras 7.




Figura 7 – Proposta acústica da Concatedral: (A) Vista da nave; (B) Vista do altar.

Com a utilização dos materiais expostos acima, o Tempo de Reverberação da igreja alcançou níveis aceitáveis, conforme a Figura 9.

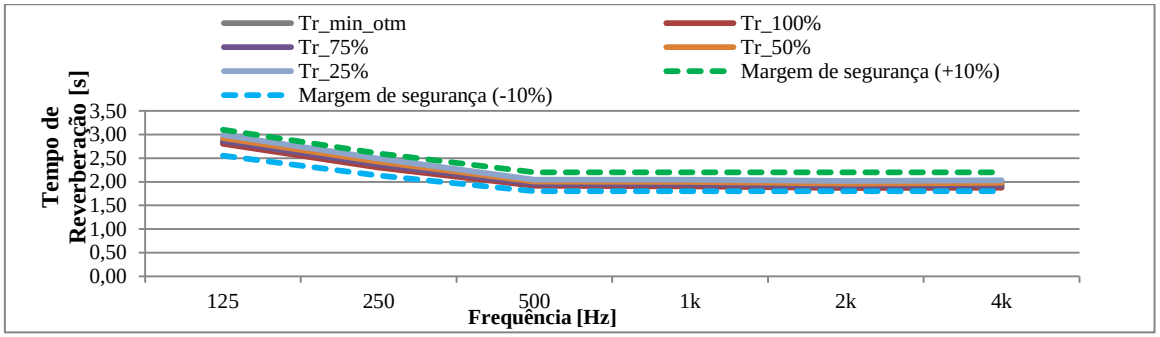



Figura 9– Tempo de reverberação na proposta da Concatedral.

Após o cálculo do TR, foi feito o estudo da distribuição dos raios sonoros, mostrado na Figura 10. Observa-se que após a proposta de intervenção acústica do recinto, a distribuição sonora foi melhor direcionada ao público. Os raios que não são direcionados aos ouvintes são absorvidos pelos materiais, assim evitando os principais problemas com as reflexões dos raios sonoros como acontece atualmente.

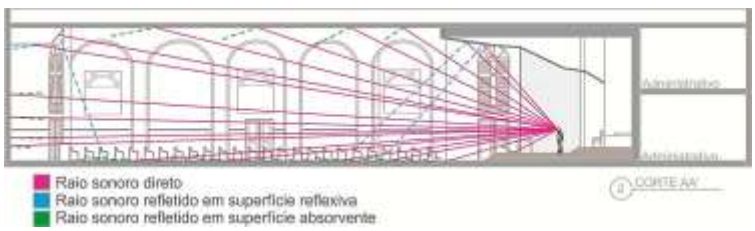



Figura 10 – Distribuição dos raios sonoros proposta acústica da Concatedral, em corte transversal.

Para tentar diminuir a problemática do isolamento sonoro, já que a igreja não poderia funcionar de portas fechadas durante as cerimônias, sugeriu-se que a Concatedral mantenha fechadas durante a liturgia as 3 portas que estão voltadas para a lateral voltada para o Largo Dom Fernando Gomes (lado norte), onde se localiza o maior fluxo de carros, para assim diminuir o ruído proveniente do trânsito.

## 5.2 Correção do condicionamento eletroacústico

O direcionamento e o posicionamento das caixas de som que compõem um sistema de reforço sonoro são essenciais para a eficiência deste sistema. Para a melhoria da qualidade eletroacústica da Concatedral, sugere-se retirar as 14 caixas acústicas que estão fixadas nas paredes e colocar o sistema de *cluster* central, composto por 4 caixas acústicas. Para as caixas tipo monitores sugeriu-se colocar duas caixas, uma direcionada para o padre e outra para os músicos da igreja, com maior distanciamento do emissor, diferente da atual, que fica muito próxima da fonte. Indica-se que as caixas fiquem à 2 m de distância da fonte, para que o som seja direcionado aos ouvidos. Outro problema que interfere diretamente na boa qualidade da sonorização artificial da igreja é a localização da mesa de som. Para solucionar essa problemática, sugere-se relocar a mesa de som para os fundos da igreja, com a finalidade do operador de áudio ter maior controle e percepção do som no recinto. Para maior comodidade do operador de áudio e disposição dos equipamentos eletroacústicos, indicou-se um *rack* para mesa de som. Os músicos também foram relocados de sua posição atual. Sugeriu-se colocá-los onde atualmente está o coral da igreja e o coral da igreja ficaria na outra lateral onde ficam os bancos próximos ao altar, estes estariam melhor direcionados ao público. Todas as intervenções são mostradas na Figura 11.

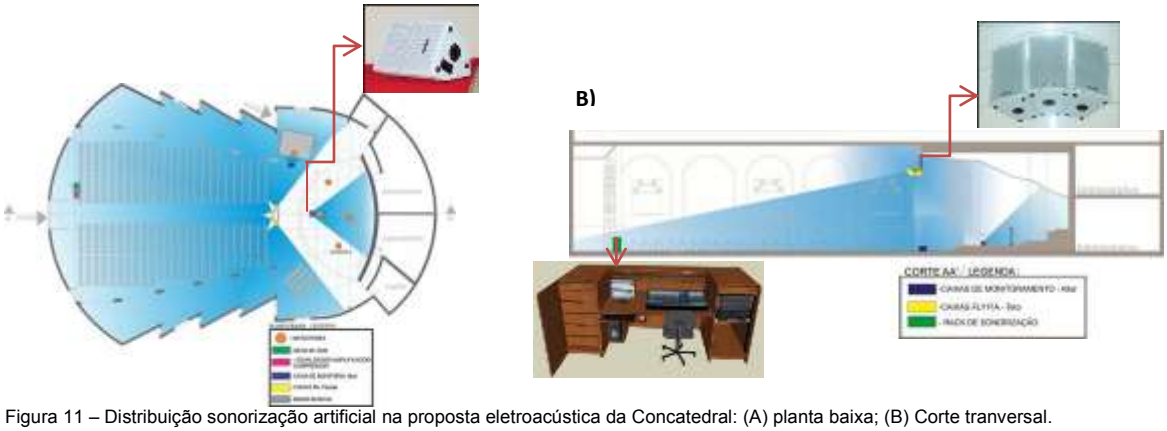



Figura 11 – Distribuição sonorização artificial na proposta eletroacústica da Concatedral: (A) planta baixa; (B) Corte tranversal.

Para correção eletroacústica foi possível recalcular a potência necessária para a igreja com o novo tempo de reverberação proposto. Deste modo, foi realizada uma comparação entre a potência eletroacústica atual e a proposta, para a frequência de 500Hz, conforme mostra a Tabela 4. Para o melhoramento do condicionamento acústico, conclui-se que fazendo um tratamento acústico buscando atingir valores ótimos relacionados ao tempo de reverberação e isolamento acústico, o recinto necessitará de menos potência acústica para alcançar o objetivo de transmitir a mensagem de forma que todos dentro do templo entendam, contribuindo diretamente para um menor custo com equipamentos eletroacústicos.

Tabela 4**:** Nova Proposta- Potência eletroacústica instalada.

| **Potência Eletroacústica Instalada (500Hz)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Ótimo** | **25% de ocupação** | **50% de ocupação** | **75% de ocupação** | **100% de ocupação** |
| TR (s) | 2,00 | 1,86 | 1,90 | 1,94 | 1,98 |
| Potência (W) | 1.075,7 | 1.156,7 | 1.132,4 | 1.110,1 | 1.086,6 |
| **Potência atual= 3.700 W** | | | | | |
| **Potência proposta= 1.400 W** | | | | | |

É importante ressaltar que o valor da potência eletroacústica sugerida na proposta ficou acima do valor ótimo, pois esta pode variar em relação ao nível de Tr, que depende do público

existente, portanto decidiu-se aumentar esse valor, a fim de satisfazer os dias que as celebrações tiverem o maior número de ouvintes.

## 6. CONCLUSÕES

O artigo mostra uma avaliação da qualidade acústica em uma igreja católica, relacionando o desempenho acústico e a eletroacústica, e por fim propõe um projeto de adequação acústica para o recinto.

Na avaliação do espaço, notou-se que os condicionantes acústicos encontrados no projeto atual não atendiam aos requisitos mínimos necessários para a realização das atividades pertinentes ao ambiente, como a música e a fala, sendo perceptível a má qualidade acústica na avaliação técnica e na avaliação dos usuários. Com isso, viu-se a necessidade de uma intervenção no recinto a fim de colaborar com o bom desempenho acústico da edificação.

Como proposta de adequação acústica na Concatedral, foi sugerida a utilização de materiais com coeficientes de absorção capazes de atender às exigências do ambiente, contribuindo para adequação dos níveis de condicionamento sonoro em seu interior, como também a modificação do sistema de sonorização artificial, diminuindo a quantidade de caixas de reforço sonoro direcionadas ao público e posicionando corretamente os outros equipamentos eletroacústicos existentes na igreja. Desta forma, assegurou-se um bom desempenho acústico na Concatedral sem interferir nas condicionantes históricas e litúrgicas.

A análise dos dados da presente pesquisa confirma que, independente do tipo e qualidade de um sistema de reforço sonoro, seu desempenho depende diretamente das propriedades acústicas do próprio ambiente. Desta forma, a instalação e utilização dos sistemas de reforço sonoro não dispensam um cuidadoso planejamento acústico do edifício.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

____. **NBR 10152**: Acústica – Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1986.

____. **NBR 12179**: Tratamento Acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

BARBO, M. N. **Avaliação acústica de um templo católico de grandes dimensões submetido à excitação impulsiva**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSM, 2009.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica**. Brasília: Thesaurus Editora, 2010.

CAAS – Comissão Arquidiocesana de Arte Sacra. **Guia de informações para projeto e execução de igrejas**. Arquidiocese de Porto Alegre, RS, 2005.

CUNHA, I. B. da. **A influência dos sistemas de reforço sonoro na qualidade acústica de igrejas católicas**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

GOOGLE EARTH-MAPS. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Arapiraca+-+AL/@-9.7531448,-36.6605696,17z/data=!4m2!3m1!1s0x705d59f85a60b6f0374f7f3fba>. Acesso em: 21/02/2015.

NASCIMENTO, J. C. R. do. **Desenvolvimento de um sistema eletroacústico para sonorização de ambientes– Estudo de caso em uma igreja**. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina, 2012.

OLIVEIRA, J. R. de. **Qualidade acústica em igrejas: relação entre o tratamento acústico e a eletroacústica**. Trabalho Final de Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

SEPLAM – Secretaria Planejamento Municipal de Arapiraca. **Arquivos do mapeamento territorial**. 2011

SILVA, P. **Acústica Arquitetônica e condicionamento de Ar**. 6ª ed. Belo Horizonte: EDTAL – Empresa Termo Acústica LTDA, 2011.

SOUZA, L. C. L. de. ALMEIDA, M. G. de.; BRAGANÇA, L. **Bê-a-bá da acústica arquitetônica**: ouvindo a arquitetura. São Carlos: Edufscar, 2009.

SAINT-GOBAIN

Innovación y eficiencia energética para construir un **Hábitat Sostenible**




ISOVER
La referencia en el aislamiento sostenible

Placo
Soluciones innovadoras en yeso

weber
Morteros industriales y áridos ligeros de arcilla expandida para la Edificación Sostenible

GLASSOLUTIONS
Soluciones en vidrio

CLIMALIT PLUS
Aislamiento Térmico Reforzado para las ventanas

El concepto Multi-Confort de Saint-Gobain apuesta por un uso eficiente de la energía en la edificación garantizando al mismo tiempo el máximo confort

EPD VERIFIED
Declaración Ambiental de Producto Certificada (Environmental Product Declaration)

GBCe
Saint-Gobain Patrocinador oficial

SAINT-GOBAIN 350
350 años en el mundo y 10 en España.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD TORTUOSIDAD Y RESISTENCIA AL FLUJO EN FIBRAS RECICLADAS PROCEDENTES DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

PACS: 43.55.Ev

M. Zamorano Cantó [1] ; J. Segura Alcaraz [2] ; *A.V. Nadal Gisbert* [3] ;J.E. Crespo Amorós [4];
[a]Universidad Politécnica de Valencia, Departamento ingeniería textil y papelera E.P.S.A., Campus d'Alcoi, 03801 Alcoy, Spain
E-mail: mzamoran@upvnet.upv.es.
[b] Universidad Politécnica de Valencia.,Centro de tecnologías físicas, Campus de vera s/n Valencia,
E-mail: jsegura@mcm.upv.es
[c] Universidad Politécnica de Valencia, GICAE. Instituto de Tecnologia de Materiales, E.P.S.A., Campus d'Alcoi, 03801 Alcoy, Spain
E-mail: anadal@mcm.upv.es
[d] Universidad Politécnica de Valencia, GICAE.Instituto de Tecnologia de Materiales., E.P.S.A., Campus d'Alcoi, 03801 Alcoy, Spain
E-mail: jocream@dimm.upv.es

## ABSTRACT

In this paper the characterization of porosity, tortuosity and flow resistance of panels formed from fibers coming from End of Life Tires (ELT's) is done, the work is a starting point in the study of this such materials for use in architectural acoustics applications. The influence of shaping parameters like: Pressure, time, temperature, in the aforementioned properties: is studied. We conclude that there is a relationship between the shaping parameters and acoustic intrinsic properties of these fibrous materials, especially between pressure and porosity, tortuosity permeability.

## RESUMEN

En este trabajo se realiza una caracterización de la porosidad, tortuosidad y resistencia al flujo de paneles conformados a partir de fibras textiles provenientes del reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU´s), el trabajo es un punto de partida en el estudio de este tipo de materiales para su uso en aplicaciones de acústica arquitectónica. Se estudia la influencia de las condiciones de conformación: presión, tiempo, temperatura, en las propiedades mencionadas. Se concluye que existe una relación entre los parámetros de conformación y las propiedades intrínsecas acústicas de estos materiales fibrosos. Especialmente entre la presión, y la porosidad, tortuosidad y la permeabilidad.

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudian las relación entre las condiciones de conformado de paneles construidos con fibras textiles recicladas de NFUs, con determinados parámetros acústicos. Caben destacar en esta línea de estudio los trabajos de Horoshenkov, K. V. et al. [1] que investigan la relación entre los parámetros de la distribución de poro, porosidad tortuosidad y resistencia al flujo con la morfología del material, compactación y densidad reproducible con muestras de grano diferente]. Fages, E. et al.[ 2] realizan el conformado de telas sin tejer con diferentes composiciones de materias determinando la porosidad usando características geométricas como el grosor y la superficie de la masa] Benkreira, H. et al. [3 utiliza residuos de

neumáticos caucho y fibras así como residuos de alfombras, con la ayuda de un poliuretano o polímeros similares para compactar el grano y la fibra y controlar la rigidez de la estructura y la evolución interior en la creación o de celdas, las propiedades estructurales(Densidad, Porosidad, resistencia al flujo, Tortuosidad y Grosor) las propiedades de conformación(Absorción del sonido, Transmisión del sonido, Impacto aislante del sonido y conductividad térmica) fueron medidos como función de la naturaleza y concentración del adhesivo aglutinante Yilmaz et al. .[4] Investiga los efectos de los tratamientos térmicos, debidos a la conformación de aislantes del sonido a partir de nonwomen para revestimiento de automóviles , por tanto es crucial la investigación de los parámetros de resistencia al flujo, resistividad y coeficiente de incidencia normal de absorción del sonido y su relación con los parámetros materiales como la medida de la fibra porosidad y los factores de conformación temperatura y tiempo de exposición. Comprueban que la duración del tratamiento térmico afecta a la resistencia al flujo de aire y a la absorción del sonido el tratamiento de calor aumenta la resistencia al flujo y disminuye la absorción del sonido. Encontrar el punto optimo de temperatura y su diferencia con el punto de fusión fue un factor significativo para la absorción del sonido Sgard, F. C. et al..[5] Relaciona los parámetros de conformación en un material poroso con orificios con la absorción del sonido y evalúa la influencia de los parámetros ( tamaño de agujero, la porosidad, factor de forma)]Liu , Jianli et al. [6 Tratan de encontrar un método predictivo par determinar el coeficiente de reducción del ruido evaluando cuatro parámetros estructurales ( grosor, densidad de área, porosidad y medida de poro de cada capaJose Jimenez Espadafor et al. [7] configura un panel con ayuda de un adhesivo y un geotextil a partir de las fibras textiles provenientes del reciclado de neumáticos evalúa los parámetros (coeficiente de absorción acústica con el tubo de impedancia, la caracterización mecánica de el material) y propone un modelo matemático[8]

## MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

Materiales.
Análisis morfológico de las fibras.
Se han empleado 3 clases de fibras procedentes del reciclado de NFU´s *(INDUSTRIAS DEL NEUMÁTICO S.A.U Ctra. Aspe-Novelda, 3803680 ASPE (Alicante) Spain y RECIPNEU* Parque Industrial de **Sines** - Apartado 26 7521-901 **Sines** – Portugal.
La muestra que denominaremos número uno, está formada por hilos en su mayoría retorcidos a dos cabos , la número dos está constituida por fibras cortas y la muestra numero 3 formada por hilos retorcidos a dos cabos y fibras cortas. Todas las muestras contienen partículas y polvo de caucho.

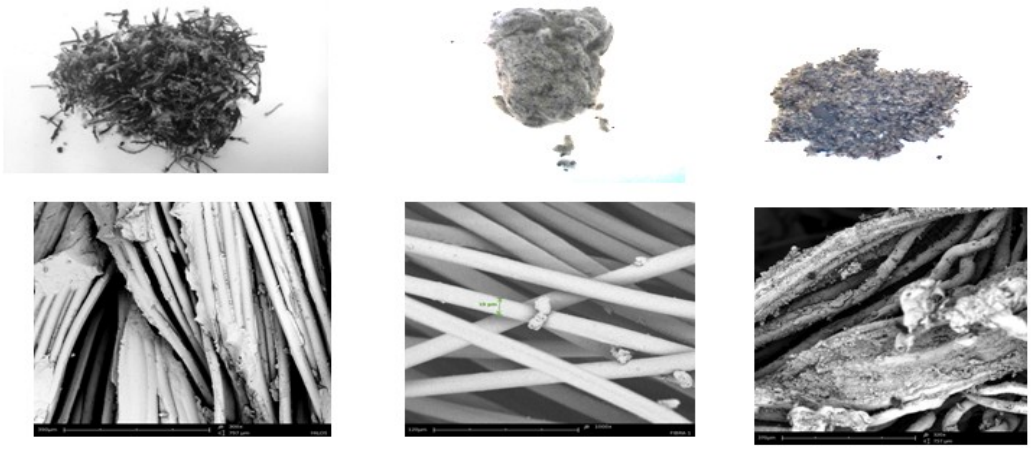


Fig. 1.- Muestras de fibras uno ,dos y tres (de izquierda a derecha)

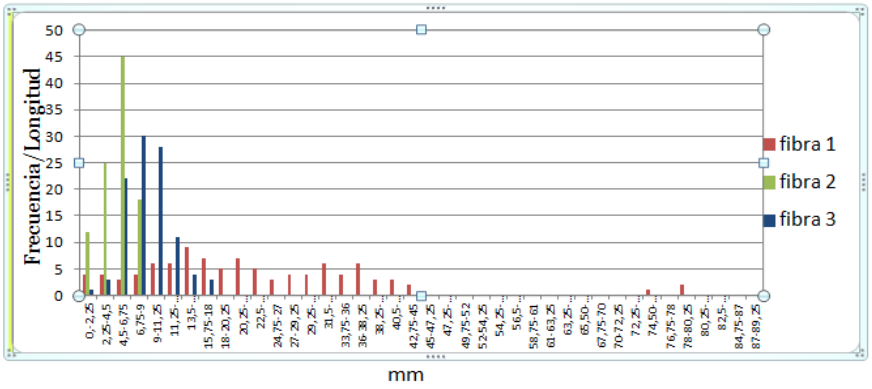



Fig.2.- Distribución de longitudes de las tres fibras

**Distribución de la longitud de las fibras**

En la fibra uno la distribución de longitudes (fig.2) abarca desde los dos milímetros hasta cuarenta y tres, está formada por hilos en su mayoría retorcidos a dos cabos.La fibra dos con una distribución de longitudes (fig.2) más uniforme oscila entre dos y nueve milímetros constituida por fibras muy cortas , casi polvo, estas fibras están más igualadas en cuanto a longitudes.En la fibra número tres la distribución por longitudes (fig.2) varía entre 2 y 15 mm formada por hilos retorcidos y fibras cortas

**Distribución diámetro**

Los diámetros en la muestra uno pertenecen a hilos formados por fibras paralelizadas y torcidas, por este motivo su distribución fluctúa entre cero con cinco y uno con treinta y tres milímetros en la muestra dos a fibras, por lo tanto sus medidas varían desde una centésima de milímetro a dos centésimas son distintos dimensionalmente por este motivo esperamos que las prestaciones como absorbentes serán distintas y en la fibra tres vemos dos distribuciones distintas al estar compuesta por hilos y fibras (Fig. 3)

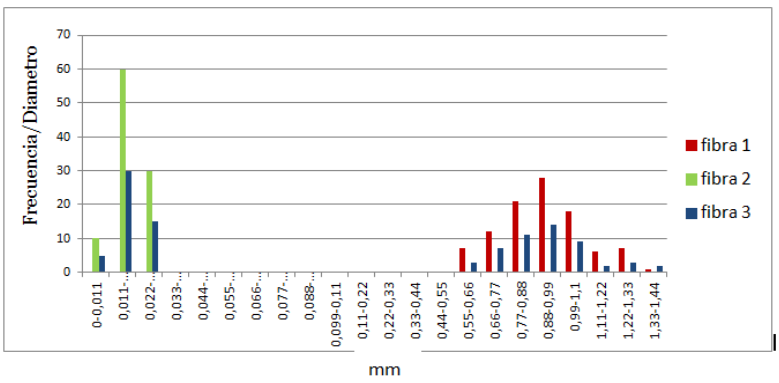



Fig.3.- Distribución de diámetros de las tres fibras

**Procedimientos**
**Elaboración de muestras**
Las masas de fibras se han compactado durante un intervalo de tiempo mediante control de presión y temperatura, se han configurado las probetas con ayuda de un troquel, . (Fig.4)



Fig.4.- Probetas fibras uno dos y tres (de izquierda a derecha)

**Medida del factor de compactación**

Determinación del factor de compactación FC., se calcula como la razón entre el volumen de materia compactado $V_c$ y el volumen inicial $V_a$.

$$FC. = \frac{V_c}{V_a}$$

**Medida de la porosidad**

La estructura de los materiales absorbentes porosos de naturaleza fibrosa consiste básicamente en un esqueleto, en nuestro caso flexible,. El aire existente en el interior del material poroso- fibroso es obligado a moverse, produciéndose pérdidas de energía por el rozamiento con las fibras del material. Los poros del material deben estar intercomunicados entre sí, La porosidad de un material, $\Omega$ , se puede definir como la relación existente entre el volumen de aire que ocupa los poros existentes dentro de un material y el volumen total del material poroso. Si denominamos $V_E$ al volumen del esqueleto y $V_A$ al volumen de aire dentro del material, podemos definir $V_T$ como el volumen total del material poroso

$$\Omega = \frac{V_A}{V_T} = \frac{V_A}{V_A + V_E}$$

La porosidad de un sistema puede ser medida por diversos métodos. El más simple es el método directo, en el cual el volumen total del sistema es medido y posteriormente la muestra es compactada para remover todo el espacio poroso. Luego la diferencia de estos volúmenes nos da la porosidad total del sistema.[9, 10]

**Procedimientos.**

**Medida de tortuosidad**

La tortuosidad $T$ determina el grado de sinuosidad que presenta el camino por donde el fluido atraviesa el medio.[11]. La tortuosidad se mide por un medio no acústico estudiado por Brown [11] segun este método podemos obtener la tortuosidad mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{\rho_c}{\rho_f}\Omega$$

siendo $\Omega$ la porosidad abierta del material y $\rho_c$ y $\rho_f$ las resistividades eléctricas medidas para el electrolito con y sin el material poroso, respectivamente.

**Procedimientos**

**Medida de la permeabilidad**

Cálculo en unidades de permeabilidad: Los Pascales obtenidos deberán traducirse a

$$\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{m}^2 \times \mathrm{h}}$$

Para ello debe aplicarse la siguiente fórmula:

$$V = k \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

V = permeabilidad al aire $(\frac{m^3}{m^2 \times h})$
k = constante variable según la tobera utilizada
P = presión (Pa)
ρ = densidad del aire 1,2 $\frac{kg}{m^3}$
La norma recomienda utilizar como unidades de medición $\frac{mm}{s}$, Para realizar la conversión de unidades $1\frac{m^3}{m^2 \times h} = 0{,}278\frac{mm}{s}$
La permeabilidad V evalúa la resistencia que ofrece un material poroso al paso de un flujo de aire a través de él. Se puede definir como la relación entre la caída de presión y la densidad del material.[12]

## EXPERIMENTAL.
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados en tablas donde cada clase de fibra ha sido evaluada bajo unas mismas condiciones, en primer lugar el tiempo, la masa y la temperatura las hemos mantenido constantes siendo la variable el factor de compactación y sucesivamente, la temperatura, el tiempo y la masa.
FC: tanto por uno; Temperatura: $^0$C; Tiempo: minutos; Masa: gramos; Densidad: kg/m$^3$ ; Δ Permeabilidad:%

**Fibra nº 1**

| | | Factor de conformación variable | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab. |
| 220 | 90 | 550 | 0,50 | 430 | 0,666 | 1,435 | 827,772 | -23.2% |
| 220 | 90 | 550 | 0,64 | 463 | 0,592 | 5,779 | 636,313 | |
| | | Temperatura variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 220 | 60 | 550 | 0,50 | 413 | 0,650 | 1,802 | 476,719 | 15,9 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 380 | 0,685 | 1,315 | 566,629 | |
| | | Tiempo variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 550 | 0,64 | 476 | 0,620 | 2,150 | 769,265 | 0 |
| 240 | 90 | 550 | 0,64 | 485 | 0,620 | 2,490 | 769,265 | |
| | | Masa variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 450 | 0,50 | 305 | 0,740 | 1,321 | 1695,474 | -43,1 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 380 | 0,685 | 1,315 | 966,629 | |

Vemos que los parámetros que influyen en la conformación de esta fibra son la masa y el factor de compactación o sea la densidad mientras que la temperatura afecta en menos cuantía y el tiempo no afecta.

**Fibra nº 2**

| | | Factor de conformación variable | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 220 | 90 | 550 | 0,50 | 420 | 0,650 | 6,764 | 182,498 | 62,4 |
| 220 | 90 | 550 | 0,64 | 446 | 0,592 | 5,779 | 484,868 | |
| | | Temperatura variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 220 | 60 | 550 | 0,50 | 332 | 0,667 | 7,184 | 492,883 | -65,3 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 375 | 0,655 | 6,754 | 171,427 | |
| | | Tiempo variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 550 | 0,64 | 534 | 0,594 | 12,657 | 216,840 | -11,1 |
| 240 | 90 | 550 | 0,64 | 543 | 0,600 | 9,335 | 192,934 | |
| | | Masa variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 450 | 0,50 | 311 | 0,719 | 7,760 | 254,267 | -32,6 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 375 | 0,655 | 6,754 | 171,427 | |

En esta fibra el parámetro menos influyente es el tiempo y los que más el factor de compactación, la masa introducida en el molde y la temperatura.

**Fibra nº 3**

| | | Factor de conformación variable | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 220 | 90 | 550 | 0,50 | 378 | 0,769 | 2,891 | 483,314 | -54,6 |
| 220 | 90 | 550 | 0,64 | 484 | 0,604 | 6,684 | 224,548 | |
| | | Temperatura variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 220 | 60 | 550 | 0,50 | 321 | 0,711 | 5,217 | 451,388 | 22,9 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 343 | 0,712 | 3,563 | 585,323 | |
| | | Tiempo variable | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 550 | 0,64 | 421 | 0,690 | 4,018 | 500,770 | -15,3 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 240 | 90 | 550 | 0,64 | 492 | 0,684 | 5,958 | 424,548 | |
| Masa variable | | | | | | | | |
| ºT | t' | Masa | FC. | Densidad | Porosidad | Tortuosidad | Permeabilidad | Δ Permeab |
| 240 | 60 | 450 | 0,50 | 295 | 0,748 | 2,592 | 827,772 | -39,6 |
| 240 | 60 | 550 | 0,50 | 343 | 0,712 | 3,563 | 500,770 | |

La fibra tres el parámetro menos influyente es el tiempo y los que más influyen la masa el factor de compactación y la temperatura.

En general y para los tres tipos de fibras el tiempo de compactación influye poco, lo que indica que influye muy poco en las posibles reacciones en y entre las fibras y entre las fibras y el molde. El incremento de las masa es evidente que influye dado que es un factor determínate de la densidad del producto final, lo mismo podemos indicar sobre el factor de compactación. La influencia de parámetros como la temperatura son dependientes del tipo de fibra y especialmente de su contenido en caucho que puede provocar en el proceso de sinterizado revulcanizados en ciertos puntos de la muestra.

## CONCLUSIONES

- Los diferentes valores obtenidos para las porosidades y tortuosidades son resultado de la diferente configuración de las muestras debido a los diferentes tipos de fibra utilizados y a la variación de los parámetros de conformado. Se obtienen porosidades que oscilan entre 0,592 y 0,769. Tortuosidades 1,315 y 12,657
- Las densidades oscilan entre 295 y 543 Kg/$m^3$
- Las permeabilidades oscilan entre 171 y 1695 $m^3/m^2h$
- Podemos pués concluir que los productos obtenidos son relativamente densos comparados con las espumas de naturaleza polimérica, El estudio realizado ha sido amplio y exhaustivo.
- Nuestro siguiente paso es el la medida de la impedancia acústica y el coeficiente de absorción,
- El análisis de modelos de comportamiento de materiales porosos de naturaleza fibrosa o granular, en comparación con nuestro producto nos permitirá definir el modelo de comportamiento acústico que algunos casos puede ser un hibrido de ambos.

## REFERENCIAS

[1] K.V. Horoshenkov, M.J. Swift, Applied Acoustics, 62 (2001) 665-690.
[2] E. Fages, M.A. Cano, S. Girones, T. Boronat, O. Fenollar, R. Balart, Textile Research Journal, 83 (2013) 426-437.
[3] H. Benkreira, A. Khan, K.V. Horoshenkov, Chemical Engineering Science, 66 (2011) 4157-4171.
[4] N.D. Yilmaz, N.B. Powell, P. Banks-Lee, S. Michielsen, Journal of Industrial Textiles, 43 ( 2013) 231-246.
[5] F.C. Sgard, X. Olny, N. Atalla, F. Castel, Applied Acoustics, 66 (2005) 625-651.
[6] J. Liu, W. Bao, S. Wang, B. Zuo, L. Chen, Z. Chen, W. Gao, Noise Control Engineering Journal, 61 (2013) 500-508.
[7] F.J. Jimenez-Espadafor, J.A. Becerra Villanueva, M.T. García, E.C. Trujillo, A.M. Blanco, Materials & Design, 32 (2011) 3608-3616.
[8] R.E. Collins, (1976).
[9] A.E. Scheidegger, Soil Science, 86 (1958) 355.

[10] Brown JS. Porous media. Geophysics 1980;45(8):1269–75
[11] P. Carman, Transactions-Institution of Chemical Engineeres, 15 (1937) 150-166.
[12] C.t.A.C. 40, in: C.I. Español (Ed.) UNE EN_ISO 9237, AENOR, Madrid, 1995.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LANA DE OVEJA: UNA ALTERNATIVA NATURAL PARA LA ABSORCIÓN SONORA

**PACS: 43.55Ev**

Alba Jesús[1]; Del Rey Romina[1] ; Uris Antonio[1]; Candelas, Pilar[1]
[1]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica. Universitat Politècnica de València.
C/ Paraninfo nº1, Grau de Gandia 46730 (Valencia). España.
E-mail: jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es, auris@fis.upv.es, pcandelas@fis.upv.es

**ABSTRACT**
Since October 2014 is being carried out the ECO-INNOVATION WOOL4BUILD project. Its goal is convert waste fibers from sheep's wool in a new natural absorbent acoustic material. Several acoustic tests have being carried out during the first year of the project; control tests using Kundt tube, airflow resistivity tests and tests in the reverberation chamber of the Escola Politécnica Superior de Gandia. Samples were manufactured by other project partners and in them different densities, thicknesses and percentages of the quality of the wool were combined. The results and conclusions of these tests are shown.

Keywords: Eco materials, ECO-INNOVATION, sheep wool, acoustic characterization.

**RESUMEN**
Desde octubre de 2014 se está llevando a cabo el proyecto ECO-INNOVATION, WOOL4BUILD. Se pretende convertir las fibras de deshecho de peletería de lanas de oveja, en un nuevo material absorbente acústico natural.
En la primera anualidad del proyecto se han realizado diferente sensayos acústicos: ensayos de control en tubo de Kundt, ensayos de la resistividad al flujo del aire y ensayos en cámara reverberante de la Escuela Politécnica Superior de Gandia. Las muestras han sido elaboradas por otros socios del proyecto y en ellas se combinan diferentes densidades, espesores y porcentajes de calidad de lana. Se muestran los resultados y conclusiones de estos ensayos.

Palabras clave: Ecomateriales, ECO-INNOVATION, lana de oveja, caracterización acústica.

## INTRODUCCIÓN

En octubre de 2014 se inicia el proyecto europeo ECO-INNOVATION - WOOL4BUILD ECO/13/630249 – WOOL4BUILD "IMPROVED ISOLATION MATERIAL FOR ECO-BUILDING BASED ON NATURAL WOOL [1]. El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un producto sostenible para el aislamiento de edificios basada en los residuos de pelo y lana que se produce en la industria peletera con buen rendimiento en aislamiento térmico y acústico.

En [2] se desarrolla el objetivo de este proyecto, así como se describen las características de la piel de oveja que le aportan a las fibras de su lana, posibilidades para ser usadas en aplicaciones arquitectónicas. Aunque el diámetro medio de las fibras de lana de oveja, varía en función de la raza de oveja, en [2] se describen detalles del diámetro de la fibra y se compara con fibras ya consolidadas como absorbentes acústicos como las de PET [3] o Kenaf [4].

Para la validación de éstas lanas naturales como materiales para aplicaciones acústicas debe tenerse en cuenta intervalos de trabajo en función del diámetro de la fibra, que parecen asociados a la raza o grupo de ovinos citados. Los expertos en peletería clasifican éste tipo de diferencias como "Lana de Primera Clase" o "Lana de Segunda Clase". Este tipo de materiales es de gran interés actualmente. Se pueden encontrar en el mercado algunas lanas absorbentes que incorporan lana de oveja en su fabricación, o referencias que tratan los beneficios del uso de este tipo de materiales respecto a otros [5]. Sin embargo, es complicado encontrar el procedimiento de fabricación y/o la composición exacta.

En este trabajo se presentan resultados de la caracterización acústica de muestras de lana de oveja de distintas composiciones, densidades y espesores. Se muestran resultados del coeficiente de absorción en incidencia normal, de la resistencia específica al flujo, de la absorción en incidencia aleatoria o cámara reverberante, así como una clasificación acústica en función de distintas clasificaciones usualmente utilizadas para materiales absorbentes acústicos.

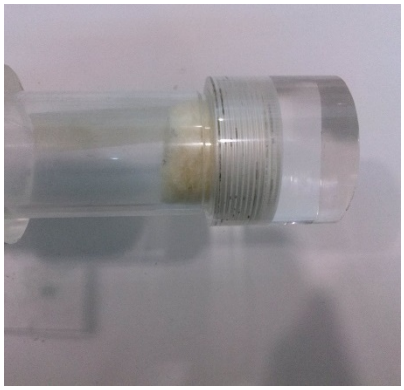
## CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

### Coeficiente de Absorción en Incidencia Normal

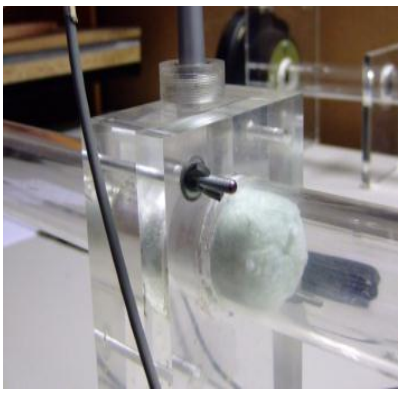
El coeficiente de absorción acústica en incidencia normal, $\alpha$, es el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra de ensayo (sin retorno) y la energía acústica incidente, para una onda acústica plana en incidencia normal. La norma UNE EN ISO 10534-2:2002 [6], establece un procedimiento de ensayo para determinar el coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos mediante, un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal. Las mediciones descritas en el procedimiento de la norma son útiles en investigación básica y en el desarrollo de productos. Se realizaron ensayos bajo esta norma [6] en los laboratorios de la EPS Gandia de la Universitat Politécnica de València (EPSG-UPV). En la figura 1 se pueden observar detalles de alguno de éstos ensayos.

### Resistencia al flujo. Métodos Indirectos.

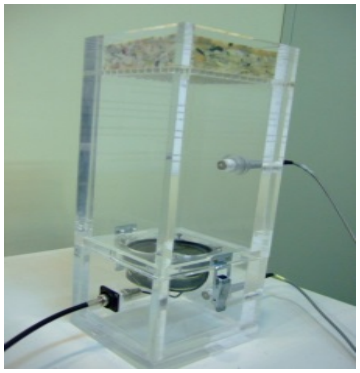
Para evaluar la resistencia al flujo de las muestras de lana de oveja, se utilizan dos métodos de medida indirectos, y alternativos a la norma ISO 2093 [7]: El método indirecto de Ingard & Dear [8], y el método de Dragonetti et al. [9]. Ambos permiten la obtención de la resistencia específica al flujo para materiales absorbentes. El primero se basa también en un sistema de medida con tubo de impedancia y registro de señal en 2 micrófonos, el segundo se basa en la medida a través de cavidades con distintos volúmenes. Detalles de cada uno de éstos dos modelos, semejanzas y diferencias entre éstos y el procedimiento normalizado [7], se pueden encontrar en [10]. En la figura 1 se pueden observar detalles de éstos ensayos.



Coeficiente de Absorción en Incidencia Normal



Resistencia al Flujo (Ingard & Dear)



Resistencia al Flujo (Dragonetti et al.)

Figura 1

**Medida de la absorción acústica en cámara reverberante.**
La norma UNE-EN ISO 354:2004 [11] establece el procedimiento para la determinación del coeficiente de absorción sonora en campo difuso. Este coeficiente se obtiene a partir de los resultados de las medidas del tiempo de reverberación, con y sin muestra, en el interior de una cámara reverberante. Se realizaron ensayos bajo esta normativa [10], de 12 $m^2$ de cada muestra de lana de oveja estudiada en la cámara reverberante normalizada de la EPS Gandia de la Universitat Politécnica de València (EPSG-UPV). En la figura 2 se pueden observar detalles de alguno de éstos ensayos.



Figura 2. Ensayo de la absorción acústica según procedimiento normalizado (UNE EN ISO 354:2004) en la EPSG-UPV.

**Evaluación de la absorción acústica**
La norma UNE-EN ISO 11654:1998 [12] establece un procedimiento de obtención de un único parámetro, ($\alpha_w$, Coeficiente de absorción sonora ponderado) para evaluar el grado de absorción proporcionado por un material. Este valor ponderado se obtiene a partir de los valores de la absorción en tercios de octava que se obtienen de los ensayos en cámara reverberante. Permite “clasificar” el material absorbente según se indica en la tabla 1.

| Clase de Absorción Acústica | $\alpha_w$ |
|---|---|
| **A** | 0'90 o mayor |
| **B** | entre 0'8 y 0'85 |
| **C** | entre 0'6 y 0'75 |
| **D** | entre 0'3 y 0'55 |
| **E** | entre 0'15 y 0'25 |
| **sin clasificar** | 0'10 o menor |

Tabla 1. Clase de absorción acústica según UNE – EN ISO 11654: 1998

**RESULTADOS**

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos expuestos en el apartado anterior de 7 muestras de lana de oveja. En la tabla 2 se describen con detalle algunas de sus características como Composición, Espesor y Densidad. En la figura 3 se puede observar algún detalle de las muestras.

| | Composición | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ID MUESTRA** | **PET BI-CO** | **LANA 1ª** | **LANA 2º** | **DENSIDAD ($Kg/m^3$)** | **MASA ($g/m^2$)** | **ESPESOR (mm)** |
| 1 | 20 | 80 | 0 | 30 | 1500 | 50 |
| 2 | 20 | 40 | 40 | 30 | 1500 | 50 |
| 3 | 20 | 40 | 40 | 25 | 1250 | 50 |
| 4 | 20 | 40 | 40 | 30 | 1200 | 40 |
| 5 | 20 | 40 | 40 | 30 | 1800 | 60 |
| 6 | 20 | 40 | 40 | 40 | 2000 | 50 |
| 7 | 20 | 0 | 80 | 30 | 1500 | 50 |

Tabla 2. Composición, espesor y densidad de las muestras de lana de oveja estudiadas.

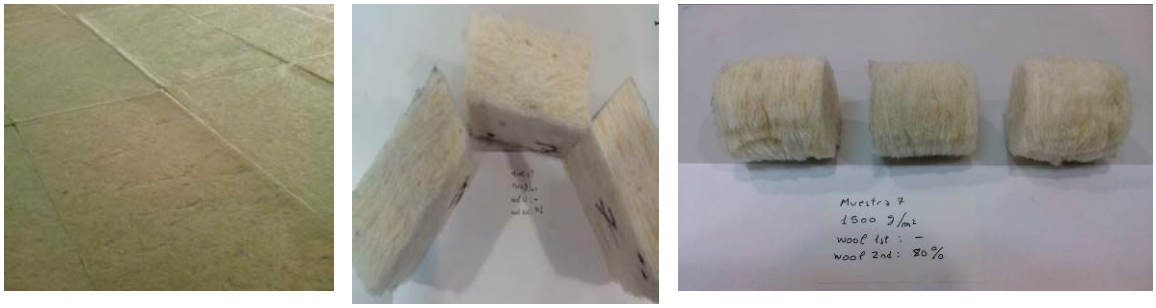



Figura 3. Algunas de las muestras de lana de oveja ensayadas.

En la tabla 3 se muestran los datos de la resistencia específica al flujo (rayls/m) de las 7 muestras sometidas a ensayo, según Ingard&Dear [8] y Dragonetti et al. [9]. Se muestra también el espesor de la muestra en condiciones de test. En la figura 4 se comparan los valores del coeficiente de absorción en incidencia normal [5] de las 7 muestras estudiadas. En la figura 5 se comparan los valores de la absorción en cámara reverberante [11] de las 7 muestras estudiadas.

Con el fin de poder observar con mayor detalle la absorción de cada una de las muestras, se comparan en la figura 6 los valores de la absorción de las muestras M1, M2 y M7, muestran del mismo espesor, misma densidad y distinta composición (ver tabla 2). En la figura 7 se comparan los valores de la absorción de las muestras M3 y M4, muestras de menor densidad,

y en la figura 8 se comparan los valores de las muestras M5 y M7, muestras de mayor densidad.

| ID MUESTRA | DENSIDAD (Kg/m$^3$) | MASA (g/m$^2$) | ESPESOR (mm) | ESPESOR (mm) TEST | Ingard&Dear (rayls/m) *1000 | Dragonetti (rayls/m) *1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 1500 | 50 | 43 | 9,29-9,31 | 6,89-7,11 |
| 2 | 30 | 1500 | 50 | 53 | 7,59-7,61 | 5,26-5,61 |
| 3 | 25 | 1250 | 50 | 43 | 9,33-9,47 | 6,70-6,90 |
| 4 | 30 | 1200 | 40 | 53 | 9,28-9,32 | 6,34-6,47 |
| 5 | 30 | 1800 | 60 | 55 | 7,18-7,22 | 5,85-6,05 |
| 6 | 40 | 2000 | 50 | 54 | 7,38-7,42 | 7,55-7,59 |
| 7 | 30 | 1500 | 50 | 44 | 9,09-9,13 | 7,52-7,68 |

Tabla 3. Densidad, espesor (fabrica7est) y valores de la resistencia específica al flujo (rayls/m) de los 2 métodos ensayados de las 7 muestras de lana de oveja sometidas a ensayo.

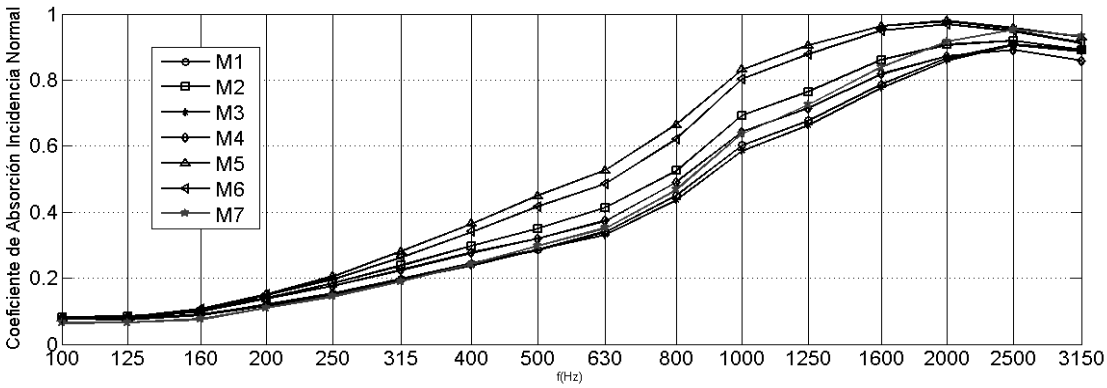



Figura 4. Valores del coeficiente de absorción en incidencia normal (UNE EN ISO 10534-2:2002) de las 7 muestras de lana de oveja sometidas a estudio.

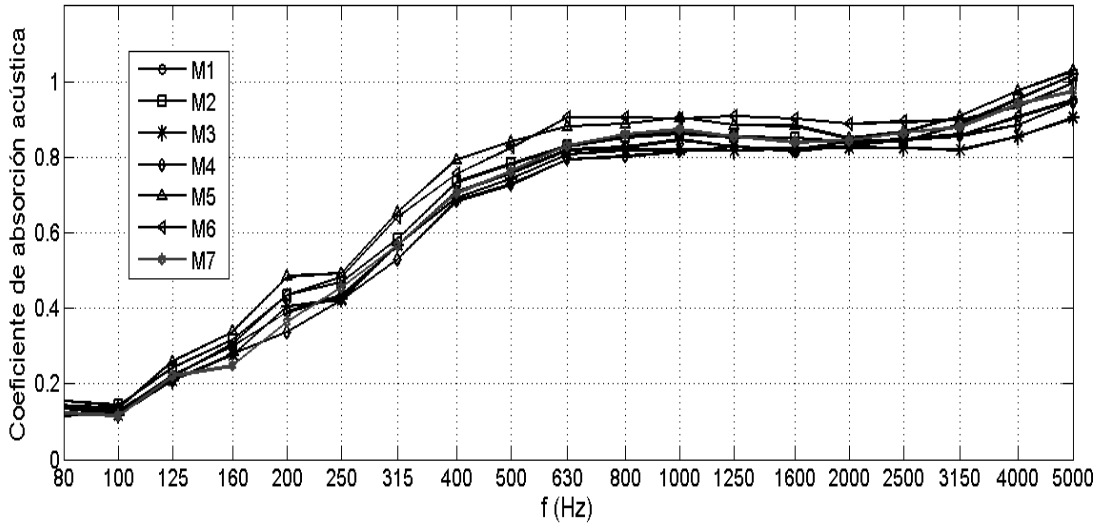



Figura 5. Valores de la absorción sonora en cámara reverberante para las 7 muestras de lana de oveja estudiadas.

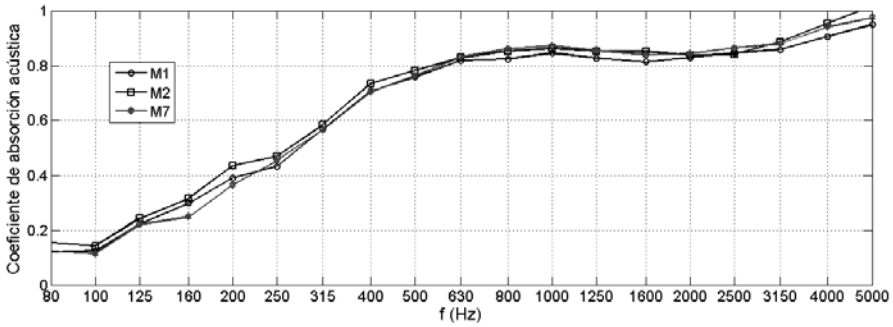



Figura 6. Valores de la absorción sonora en cámara reverberante para muestras M1, M2 y M7.

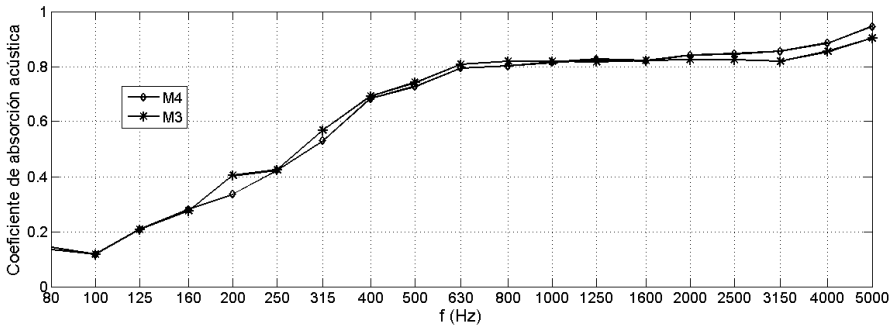



Figura 7. Valores de la absorción sonora en cámara reverberante para las muestras M3 y M4.

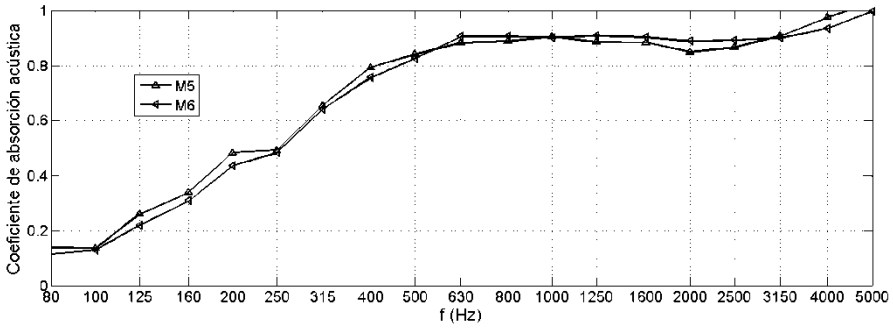



Figura 8. Valores de la absorción sonora en cámara reverberante para las muestras M5 y M6.

En la tabla 4 se comparan los valores de cada una de las muestras del coeficiente de absorción medio según el Código Técnico de Edificación (DB-HR) [13], y las clasificaciones según normativa europea [12]. En la figura 9 se comparan con otros materiales comerciales de diferente composición. Todos los datos se han obtenido en la cámara reverberante de la EPS Gandia.

| | $\alpha_{medio}$ (DB-HR) | $\alpha_w$ (11654:1958) | Clase |
|---|---|---|---|
| **M1** | 0,82 | 0,75 (H) | C |
| **M2** | 0,83 | 0,80 (H) | B |
| **M3** | 0,78 | 0,75 | C |
| **M4** | 0,80 | 0,75 (H) | C |
| **M5** | 0,87 | 0,85 | B |
| **M6** | 0,88 | 0,80 (H) | B |
| **M7** | 0,82 | 0,75 (H) | C |

Tabla 4. Coeficiente de absorción sonora ponderado y clase.

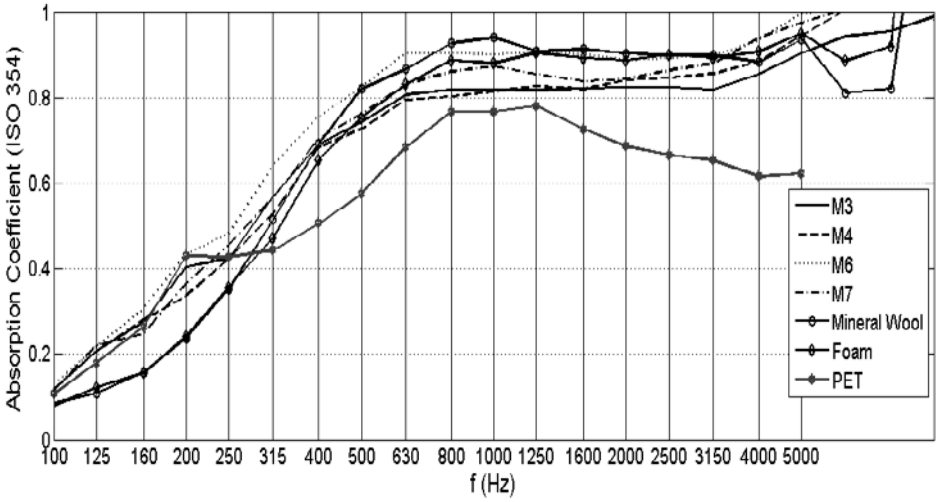



Figura 9. Valores de la absorción sonora en cámara reverberante para algunas muestras comparadas con otros materiales

**CONCLUSIONES**

En este trabajo se resumen algunos de los resultados ya obtenido en el proyecto europeo ECO-INNOVATION - WOOL4BUILD ECO/13/630249 – WOOL4BUILD "IMPROVED ISOLATION MATERIAL FOR ECO-BUILDING BASED ON NATURAL WOOL [1]. Puede observarse la gran cantidad de muestras ya fabricadas para obtener datos fiables. Respecto a los ensayos acústicos de la resistencia específica al flujo y del coeficiente de absorción en incidencia normal ya se garantiza su comportamiento como lana absorbente acústica: los cambios de densidad y espesor se reflejan de forma adecuada en los resultados de las medidas, la forma creciente con la frecuencia, valores por encima de 0,2 del coeficiente de absorción, etc.

Respecto a los datos obtenidos en cámara reverberante, si se atiende a la clase del material según la norma UNE-EN ISO 11654:1998, estos materiales son competitivos. Esto se demuestra también en la figura 9, donde puede verse que con densidades y espesores similares a otros materiales comerciales, los resultados del coeficiente de absorción en cámara reverberante son comparables, e incluso superan a alguna de las muestras.

**AGRADECIMIENTOS**

Este Proyecto está cofinanciado por Eco-innovation Initiative of the European Union". Proyecto Europeo ECO-INNOVATION - WOOL4BUILD ECO/13/630249 – WOOL4BUILD "IMPROVED ISOLATION MATERIAL FOR ECO-BUILDING BASED ON NATURAL WOOL".

Co-funded by the Eco-innovation Initiative of the European Union

This publication has been produced with the assistance of the European Union. The contents of this publication are the sole responsibility of the authors and can in no way be taken to reflect the views of the European Union".

**REFERENCIAS**

[1] ECO-INNOVATION http://ec.europa.eu/environment/ecoap/index_en.htm. ECO-INNOVATION - WOOL4BUILD ECO/13/630249 – WOOL4BUILD "IMPROVED ISOLATION MATERIAL FOR ECO-BUILDING BASED ON NATURAL WOOL.

[2] Alba J., Del Rey R., Blanes M., Marco B., "ESTUDIO PRELIMINAR DE LA ABSORCIÓN SONORA DE LANA DE OVEJA DE DESECHOS DE PELETERÍA", TECNIACUSTICA 2014 Murcia.

[3] R. del Rey., J. Alba, J. Ramis, V. Sanchis. New absorbent acoustics materials from plastic bottle remnants. Materiales de Construcción, 2011, 61,204, 547-558.

[4] J. Ramis, J. Alba, R. del Rey, E. Escuder, V. J. Sanchís, New absorbent material acoustic based on kenaf's fibre, Materiales de construcción, 60 (299), 133-143, 2010.

[5] Korjenic A., Klaric S., Hadžić A., Korjenic S. "Sheep Wool as a Construction Material for Energy Efficiency Improvement", Energies 2015, 8, 5765-5781

[6] UNE-EN ISO 10534-2:2002. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998).

[7] ISO 9053:1991. Acoustics. Materials for acoustical applications. Determination of airflow resistance.

[8] K. U. Ingard, T. A. Dear: "Measurement of Acoustic Flow Resistance". Journal of sound and Vibration 103 (1985) 567–572.

[9] Dragonetti R., Ianniello C., Romano A.R.. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method. Journal of the Acoustical Society of America. 129,2,753-764.(2010) [10] de Rey R., Alba J., Arenas J.P, Ramis J. Evaluation of two alternative procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials. Archives of Acoustics, 38 (4), 547-554 (2013).

[11] UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).

[12] UNE-EN ISO 11654:1998. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997).

[13] Real Decreto 1371/2007, del 19 de Octubre por el que se aprueba el "Documento Básico de Protección frente al ruido" del Código Técnico de la edificación.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL CONSTITUINTE NO DESEMPENHO DE DIFUSORES QRD

PACS no. 43.55.Ev

PATRAQUIM, Ricardo[1]; SANTOS, Pedro Gil[1]; GODINHO, Luís[2]; AMADO MENDES, Paulo[2]; MATEUS, Diogo[2]

[1] Departamento de Eng.ª Civil da Universidade de Coimbra,
Rua Luís Reis Santos, Pólo II da FCTUC, 3030-788 Coimbra, Portugal
{ uc2013166890@student.uc.pt, uc2006107489@student.uc.pt }

[2] ISISE, Dep. Eng. Civil Univ. de Coimbra, Portugal
Rua Luís Reis Santos, Pólo II da FCTUC, 3030-788 Coimbra, Portugal
{lgodinho@dec.uc.pt, pamendes@dec.uc.pt, diogo@dec.uc.pt }

**ABSTRACT**

There are several acoustic diffuser solutions, using different materials and configurations. However, the intrinsic characteristics of the materials constituting the diffusers (density, sound absorption, etc.) may significantly influence the performance of these solutions. In the present work, the performance of the same diffuser (a QRD type) configuration is studied, making use of three different types of materials. The chosen materials are XPS, cork agglomerate and wood, which are studied conducting laboratory tests. In addition, a numerical model (BEM) is used to better understand the phenomena involved and validate the methodologies used.

**Keywords:** Acoustic diffusers; Diffusion coefficient; ISO 17497-2; Boundary Element Method.

**RESUMO**

Existem, actualmente, diversas soluções de difusores acústicos, recorrendo a diferentes materiais. No entanto, as características intrínsecas do material que os constitui (densidade, absorção sonora, etc) podem influenciar de forma significativa o desempenho destas soluções. No presente trabalho, é estudado o desempenho de uma mesma configuração de difusor, do tipo QRD, fazendo uso de três tipos de materiais distintos, designadamente XPS, aglomerado de cortiça e madeira, através da realização de ensaios laboratoriais. Complementarmente, é utilizado um modelo numérico (BEM) de forma a melhor compreender os fenómenos envolvidos e validar as metodologias utilizadas.

**Palavras-chave:** Difusores acústicos; Coeficiente de difusão; Norma ISO 17497-2; Método dos Elementos de Fronteira.

## 1. INTRODUÇÃO

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de espaços com maiores exigências acústicas (estúdios, salas de espectáculos, etc), servindo, sobretudo, para garantir um campo sonoro adequado, sem absorção sonora excessiva e espalhando o som mais uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos ou zonas “de sombra” [1]. Grande parte dos difusores existentes no mercado corresponde a

soluções do tipo Schroeder, conhecidas por QRD (*quadratic residue diffuser*), cujas profundidades dos elementos são baseadas numa dada sequência de resíduos quadráticos.

No mercado existem variações deste tipo de difusores, muitas vezes mais por motivos estéticos do que propriamente como resultado de uma optimização do desempenho. Por outro lado, por uma questão de custo, quer na sua produção quer no transporte, esses difusores são fabricados em materiais muito diversos, desde de diferentes tipos de "plásticos" à madeira maciça. No presente trabalho pretende-se avaliar a influência do tipo de material que constitui o difusor, nomeadamente a influência da densidade. Para tal, foram construídos 3 difusores, à escala real, do tipo QRD7, desenhados para a frequência de 1400 Hz, constituídos por três diferentes materiais, madeira maciça, aglomerado de cortiça e poliestireno extrudido (XPS).

Como alguns dos modelos existentes no mercado também dispensam a utilização de guias-de-onda, por uma simplificação de construção, neste trabalho também se pretendeu avaliar a influência da sua utilização. Deste modo, foram construídos e avaliados dois difusores em madeira maciça em que um possuía guias-de-ondas e outro não.

Para além da avaliação de um único difusor, foi ainda avaliada a utilização conjunta de dois difusores idênticos, correspondendo a um período $p$=2.

A abordagem do estudo foi essencialmente experimental, com a determinação do Coeficiente de Difusão de acordo com a metodologia descrita no documento técnico AES-4id-2001 [2] que deu origem à norma ISO 17497-2 [3]. Porém, também foi utilizado o Método dos Elementos Fronteira (BEM) para modelação numérica dos difusores acústicos e obtenção do respectivo Coeficiente de Difusão, conforme descrito em [4], mais na perspectiva de validar os resultados experimentais devido a alguns constrangimentos existentes na sala semi-anecóica utilizada.

## 2. DESCRIÇÃO DOS DIFUSORES TESTADOS

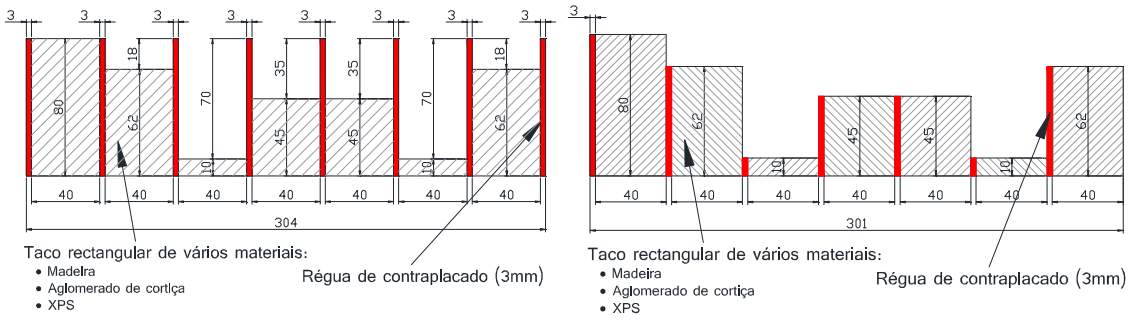
Foram construídos três difusores, idênticos em termos geométricos, mas constituídos por materiais diferentes:

- Madeira maciça: $m_v$=456 kg/m$^3$
- Aglomerado de Cortiça: $m_v$=173.6 kg/m$^3$
- Poliestireno Extrudido (XPS): $m_v$=28.3 kg/m$^3$



Figura 1: da esqª para a dirª, QRD em madeira maciça; sQRD em madeira maciça (sem guias-de-onda); QRD em aglomerado de cortiça e QRD em XPS

A dimensão dos difusores é de aproximadamente 80mm x 300mm x 600mm (profundidade x largura x altura). As profundidades das reentrâncias foram calculadas de modo que a frequência de projecto seja $f_p$≈1400Hz e a largura das mesmas são de forma a que a frequência de corte é $f_c$ ≈4300Hz.




a) b)

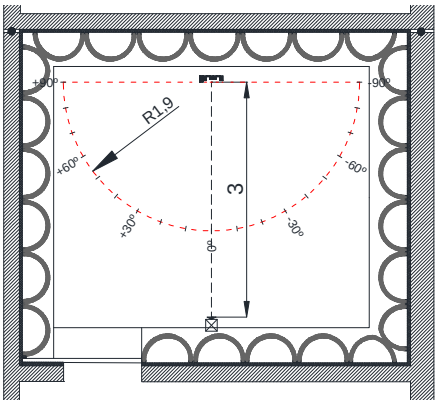
Figura 2: a) difusor QRD7 com guias-de-onda; b) Difusor sQRD7 sem guias-de-onda.

## 3. METODOLOGIA DE ENSAIO

Para permitir a realização dos ensaios para a medição do coeficiente de difusão de acordo com a Norma ISO 17497-2 [3] uma sala de 5.0 x 4.3 x 2.7 $m^3$ do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foi adaptada para o efeito. Para tal, foi aplicado um revestimento absorvente (α≈1.0, para frequências superiores a 160Hz), nas paredes e no tecto, mantendo-se o pavimento reflector, para assegurar condições acústicas que se aproximam das de um campo livre, - uma descrição detalhada deste espaço semi-anecóico pode ser encontrada em Pereira et al [5].

Tendo em conta as dimensões da sala e dos difusores a serem ensaiados, foi adoptada a configuração de teste, como mostrado na Figura 3, com o microfone colocado em um semicírculo com um raio de 1,90 m, alinhado com o plano frontal da superfície do difusor, e o altifalante, colocado a 3,0 m, centrado a 0º em relação à normal da superfície do difusor (incidência normal).

Foi adoptada uma resolução angular de 10° obtendo desta forma 19 respostas de impulso entre +90° e -90°. Com estas posições, para o teste de um único difusor (cuja largura é de 30cm) é possível garantir que 94,7% dos receptores estão fora da zona especular (no caso de 2 difusores é garantido 84,2%). As respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS (*Maximum Length Sequences*), com o máximo das sequências definido por $2^{14}$-1 = 16383 e uma duração de 20.5s.




a)



b)

Figura 3: a) layout do ensaio; b) Foto da câmara semi-anecóica utilizada nos ensaios.

O processo de medição dos coeficientes de difusão passa pela determinação da resposta impulsiva, realizando uma medição nas posições de microfone definidas, sem a superfície de ensaio presente $(h_2(t))$ e outra medição com a superfície de ensaio presente $(h_1(t))$. Posteriormente, é isolada a resposta reflectida pelo difusor a partir da subtracção entre o registo com difusor e o registo sem difusor, $(h_1(t))-(h_2(t))$. Para obter as respostas no domínio da frequência é aplicada a transformada de Fourier aos sinais impulsivos referentes a cada posição de microfone. Com a integração destas respostas em bandas de 1/3 de oitava é então

possível obter as respostas polares com intensidades sonoras $L_i$ geradas pela superfície difusora. O Coeficiente de Difusão Direccional (para cada ângulo de incidência de fonte) e para cada frequência é então obtido através da seguinte expressão:

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{L_i/10}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(10^{L_i/10}\right)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^{n}\left(10^{L_i/10}\right)^2} \quad (1)$$

Nesta expressão $\theta$ é o ângulo de incidência, $L_i$ é o nível de pressão sonora (em *dB*) na posição do receptor $i$ obtido na resposta polar e $n$ é o número de receptores (neste caso, 19).

O Coeficiente de Difusão Normalizado pode ser obtido através da expressão seguinte:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_\theta - d_{\theta,pp}}{1 - d_{\theta,pp}} \quad (2)$$

onde é o $d_\theta$ Coeficiente de Difusão Direccional do difusor e $d_{\theta,pp}$ é o Coeficiente de Difusão Direccional de uma placa plana de referência, com a mesma dimensão do difusor em avaliação. Este processo de normalização permite retirar o efeito da difracção nas arestas laterais do difusor.

Foi verificado que o processo de isolar a resposta reflectida pelo difusor a partir da subtracção $(h_1(t)) - (h_2(t))$ através do ajuste da janela temporal (que remove as reflexões residuais irrelevantes) tem influência nos resultados obtidos para o coeficiente de difusão direccional, nomeadamente nas baixas frequências (*f*<315Hz). Mas, mais importante ainda, é que o método de medição acima descrito é sensível às condições higro-térmicas da sala, logo, é importante obter as respostas $h_1(t)$ e $h_2(t)$ nas mesmas condições ambientais.

## 4. MODELO NUMÉRICO

Com o objectivo de comparar os resultados obtidos através do procedimento experimental e realizar algumas simulações iniciais, foi utilizado o Método dos Elementos Fronteira (BEM) para a modelação numérica dos difusores acústicos e para obter o respectivo Coeficiente de Difusão. Para este modelo BEM, considerou-se uma superfície rígida, de comprimento infinito segundo a direcção do eixo $z$, inserida num meio acústico infinito (figura 4), excitado por uma fonte de pressão sonora cilíndrica posicionada em $\underline{x}_F = (x_F, y_F)$, oscilando com a frequência angular $\omega$, cujo campo incidente é dado por:

$$p_{inc}(\omega, x, y) = \frac{-iA}{2} H_0^{(2)}\left(k_c \sqrt{(x - x_F)^2 + (y - y_F)^2}\right) \quad (3)$$

Nesta expressão a abreviatura $inc$ representa o campo incidente, $A$ é a amplitude de onda, $i = \sqrt{-1}$, $k_c = \omega/\alpha$ (com $\mathrm{Im}\, k_c < 0$), sendo o número de onda efectivo, $\alpha$ a velocidade de propagação do som no ar, e $H_n^{(2)}(...)$ a função de Hankel do 2º tipo, de ordem $n$.

O campo reflectido bidimensional produzido pela fonte sonora cilíndrica (ao longo da direcção $z$), que actua no meio acústico, na presença de um elemento difusor, é calculado no domínio da frequência utilizando o Método de Elementos de Fronteira (BEM). É utilizada uma abordagem clássica BEM que pode ser descrita pela equação integral de fronteira (4), assumindo que $\Gamma$ representa a interface do difusor que será discretizado.

$$c \cdot p(\underline{x}_0, \omega) = -\int_{\Gamma_2} H(\underline{x}, \nu_n, \underline{x}_0, \omega) \cdot p(\underline{x}, \omega) d\Gamma + p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega) \quad (4)$$

Nesta equação $H$ é a função de Green para uma região acústica infinita que permite que a derivada da pressão sonora ($q$) seja obtida no ponto $\underline{x}$ da fronteira $\Gamma$ quando a fonte harmónica virtual actua em $\underline{x}_0$ da fronteira; $c$ depende da geometria da fronteira no ponto e é

igual a $1/2$ se $\underline{x}_0 \in \Gamma$ e a fronteira é suave; $\upsilon_n$ é o vector normal exterior da fronteira; $p^{inc}(\underline{x}, \underline{x}_F, \omega)$ é o campo incidente quando a fonte está posicionada em $\underline{x}_F$, obtido através da equação (3).

A equação (4) é resolvida após a discretização da interface $\Gamma$ em $N$ elementos de fronteira constantes. As integrações resultantes são calculadas utilizando um esquema de quadratura de Gauss e a resolução do sistema de equações resultante permite obter a pressão nodal. O campo sonoro reflectido em qualquer ponto do domínio pode então ser calculado através da aplicação da equação integral de fronteira.

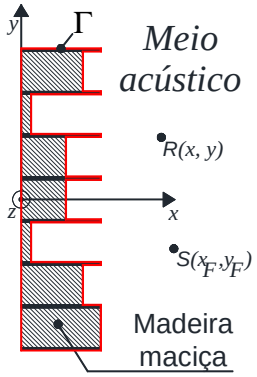



Figura 4:Geometria do modelo numérico implementado.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

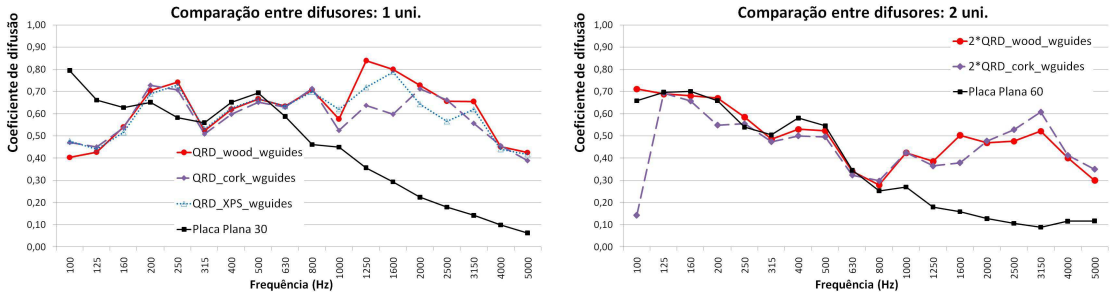
Foram testados difusores com a mesma configuração geométrica mas constituídos por materiais diferentes (ver ponto 2). Foi ainda avaliada a influência dos guias-de-onda (somente nos difusores de madeira maciça).

Ensaiaram-se ainda placas planas com a mesma dimensão dos difusores, de modo a comparar o desempenho dos difusores com o de uma superfície plana (com a mesma dimensão).

Todos os ensaios foram realizados com a fonte sonora apenas na posição perpendicular às superfícies dos difusores (incidência normal, $\theta = 0°$)

### 5.1 Influência do material

Na figura 5 estão representados os resultados obtidos para os difusores constituídos pelos diferentes materiais descritos no ponto 2. Pode-se observar que, no caso da avaliação de apenas um difusor, que o mais denso (madeira maciça) tem um coeficiente de difusão mais elevado. Contudo, o mesmo já não se verifica no ensaio com dois difusores. Em todos os casos, os difusores têm melhor desempenho que uma placa plana a partir dos 630Hz e 800Hz, respectivamente. Também se verifica que apenas no difusor de madeira maciça é visível a frequência de projecto $f_p$≈1400Hz corresponder ao valor máximo de $d_\theta$.

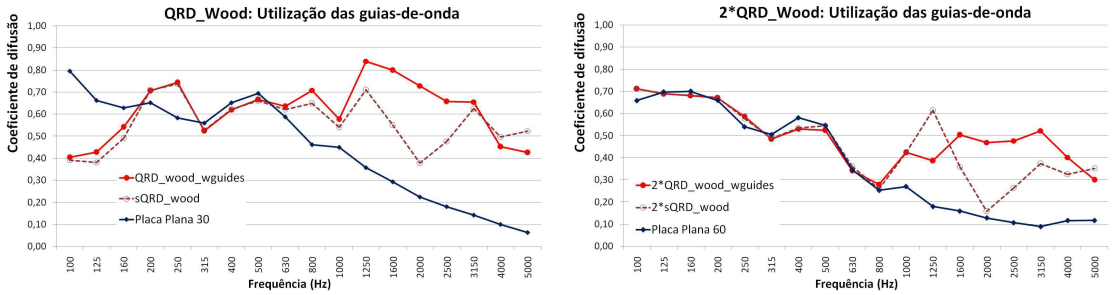



a) b)

Figura 5: Comparação de difusores de materiais diferentes – a) Um difusor); b) Dois difusores.

### 5.2 Influência das guias-de-onda

Na figura 6 estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça com e sem guias-de-onda. Nos mesmos gráficos também se apresentam os resultados obtidos para as respectivas placas planas.




a) b)

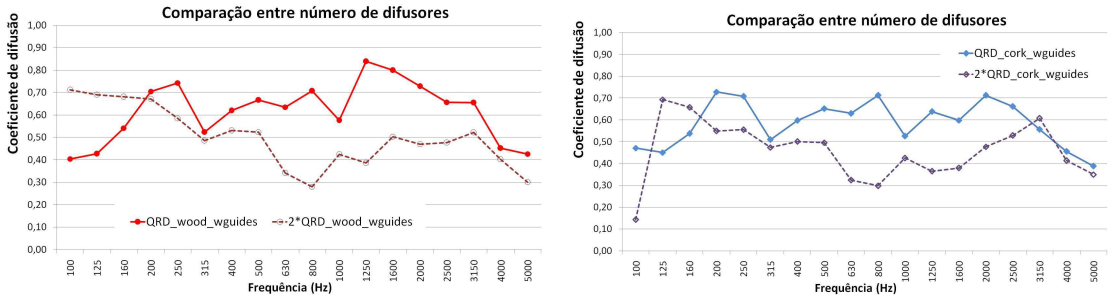
Figura 6: Influência dos guias-de-onda - a) Um difusor); b) Dois difusores.

É visível, de uma forma generalizada, que a utilização dos guias-de-onda conduz a coeficientes de difusão mais elevados sendo notório que os valores máximos do coeficiente de difusão ocorrem entre as bandas de terço de oitava dos 1250Hz e 1600Hz e entre as dos 2500Hz e 3150Hz (que corresponde à frequência de projecto, $f_p$, e a 2*$f_p$). A ausência de guias-de-onda altera os valores da frequência para os quais são atingidos os valores máximos de $d_\theta$. Mas a maior consequência da não utilização dos guias-de-onda é a quebra acentuada do $d_\theta$ na banda dos 2000Hz.

### 5.3 Influência do período

A utilização de um maior número de repetições da superfície difusora permite uma melhor representação das condições de aplicação reais dos mesmos, em parte pela redução do efeito da difracção nos bordos dos painéis. Contudo, medir uma grande quantidade de painéis exige instalações laboratoriais de grande dimensão para garantir as distâncias entre os painéis, fonte e receptores. Assim, na sala de ensaio utilizada no presente trabalho, de forma a garantir que mais de 80% dos receptores estão fora da zona especular, apenas foi possível utilizar no máximo 2 difusores à escala real (é possível utilizar provetes à escala 1:2 mas seria necessário caracterizar a absorção sonora, quer da madeira maciça quer do aglomerado de cortiça, de forma a garantir que essas características se mantêm com a duplicação da frequência nos ensaios à escala 1:2).

Na figura 7 estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça e de aglomerado de cortiça, ambos com guias-de-onda. Como expectável, o coeficiente de difusão é inferior quando aumenta o período e, consequentemente, a dimensão do provete em avaliação.

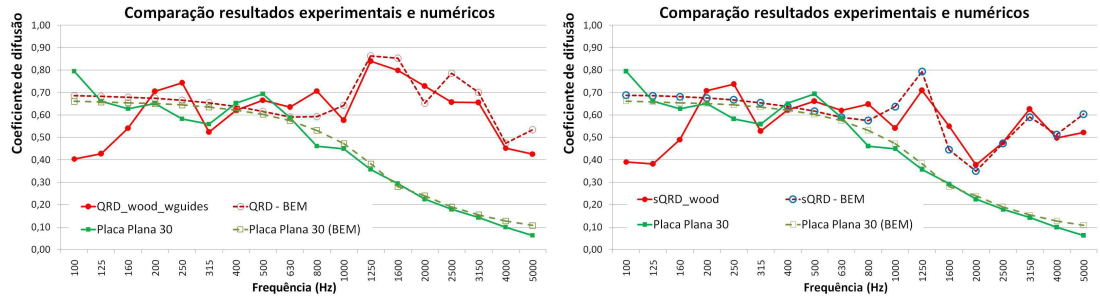



a) b)

Figura 7: Influência do número de difusores – a) QRD em madeira maciça; b) QRD em aglomerado de cortiça.

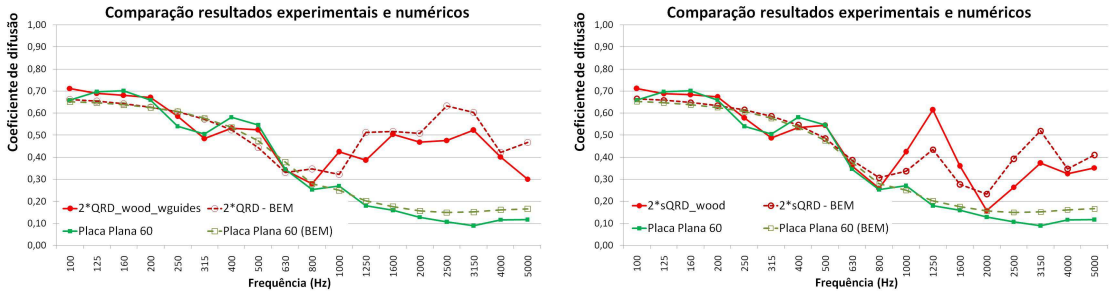
### 5.4 Comparação com o modelo numérico BEM

Para a modelação numérica foi admitido que o material que constitui o difusor é perfeitamente reflector (impedância acústica infinita). Deste modo, as comparações que são apresentadas nas figuras 8 e 9 são referentes ao difusor de madeira maciça. Apresentam-se, ainda, os resultados experimentais e numéricos referentes às placas planas que servem de comparação para o desempenho dos difusores.




a) b)

Figura 8: Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 1 difusor - a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.




a) b)

Figura 9: Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 2 difusores - a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.

Da análise dos resultados apresentados nas figuras 8 e 9, podemos dizer de uma forma geral que os resultados são bastante satisfatórios. Temos de excluir as baixas-frequências, justificadamente quer devido às dimensões da sala de ensaio, quer à janela temporal utilizada para a extracção da reflexão quer ainda devido às diferentes condições higro-térmicas, que não foi possível garantir como constantes durante a realização do trabalho.
O modelo BEM poderá ainda ser afinado de modo a ter a mesma resolução no domínio da frequência que o existente no método de ensaio, permitindo que as somas energéticas realizadas para as bandas de terço de oitavo tenham as mesmas componentes.

## 6. CONCLUSÕES

Foi demonstrado que os difusores com maior densidade têm maior coeficiente de difusão. Contudo, consegue-se um razoável desempenho com materiais de densidade inferior. Assim, a utilização de materiais mais leves pode ser uma opção viável se for tido em consideração quer o custo de fabrico quer o custo de transporte. A utilização de cortiça poderá ser uma boa hipótese pois sendo um material ecológico e esteticamente atractivo é de fácil mecanização. Para tal, tem de ser avaliada a absorção sonora de dispositivos com este material de forma a não retirarem energia em demasia.
Foi ainda demonstrado que, para QRD's tradicionais, a utilização de guias-de-onda é fundamental não só para que o desempenho seja o expectável em fase de dimensionamento do difusor (manutenção da frequência de projecto) bem como para não diminuir a eficiência do difusor.

O modelo BEM utilizado mostrou ser uma ferramenta de extrema utilidade em fase de desenvolvimento.
A sala semi-anecóica utilizada, dada as suas limitações dimensionais, não permitiu retirar conclusões nas baixas-frequências nem permite a utilização de um elevado número de períodos. Contudo, mostrou ser "consistente" para frequências superiores a 315 Hz, desde que alguns cuidados sejam implementados no protocolo de ensaio. Por outro lado, a utilização de provetes à escala permite a utilização de períodos maiores [4].

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa "Castelhano & Ferreira, S.A." o apoio disponibilizado para a realização deste trabalho. Este trabalho foi parcialmente suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia âmbito de uma Bolsa de Doutoramento BDE SFRH/BDE/96260/2013 atribuída ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

[1] T.J. Cox, P. D'Antonio: Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, Spon Press, 2nd Edition, 2009.
[2] AES-4id-2001. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
[3] ISO 17497-2: 2012. Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field.
[4] Diogo Mateus; Hélder Gonçalves; Andreia Pereira; Luís Godinho e Fernando Branco – "Avaliação do coeficiente de difusão proporcionado por diferente tipos de superfície" Tecniacústica 2014, Múrcia, Espanha, Actas em CD-Rom, 29-31 Outubro, 2014.
[5] Andreia Pereira; Hélder Gonçalves; Diogo Mateus; Luís Godinho e Fernando Branco - "Assessment of the diffusion coefficient provided by wooden panels", Forum Acusticum, 7 - 12 September, Kraków, 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ESTUDIO OBJETIVO Y SUBJETIVO DEL EFECTO DE LOS DIFUSORES BASADOS EN CRISTALES DE SONIDO

PACS: 43.55.+p , 43.55 Br, 43.55 Ka

A. Quintana[1], B. Hervas[3], I. Pérez[3], J.V. Sánchez-Pérez[2], J. Redondo[1]
[1]Instituto para la Gestión integral de Zonas Costeras.-Universitat Politécnica de València. Campus de Gandía. C. Paranimf, 1. Grao Gandía (Spain) fredondo@fis.upv.es
[2]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.-Universitat Politécnica de València. Camino de Vera s/n. Valencia (Spain)
[3]Dpto. de Comunicación Audiovisual, Documentación e Historia del Arte, Universitat Politécnica de València, Camino de Vera s/n. Valencia (Spain)

## ABSTRACT

This dissertation deals with the study of the efficiency of Sonic Crystal placed on the walls of a room from two stand points: the objective point of view and the perceptive point of view. It is intended to correlate the different traditional acoustic parameters with new ones to estimate the diffuseness degree. The different parameters have been obtained through the simulation technique FDTD (Finite Differences in Time Domain) in different conditions. The preliminary results ensure that the effect produced by the studied diffusors can be perceived by professional musicians.

## RESUMEN

Este trabajo explora la eficiencia de cristales de sonido dispuestos sobre las paredes de una sala desde dos puntos de vista, el punto de vista objetivo y el punto de vista perceptivo. Se pretenden correlar diferentes parámetros tradicionales para estimar el grado de difusión con nuevos parámetros perceptivos que cuantifiquen el efecto de los difusores basados en cristales de sonido. Para obtener ambos grupos de parámetros se ha realizado una simulación mediante la técnica FDTD (Diferencias finitas en dominio temporal) de una sala con diferentes acondicionamientos. Los resultados preliminares permiten aseverar que los difusores estudiados producen un efecto fácilmente perceptible por oyentes entrenados.

## INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de las representaciones teatrales y musicales, la homogeneización de la experiencia en toda la superficie de audiencia ha sido un punto de una importancia capital. Distintas geometrías en los recintos así como los materiales presentes en el mismo no siempre facilitan que esto sea así, sobretodo en baja frecuencia. Para conseguir un sonido más difuso en la sala se vienen utilizando los conocidos difusores de Schroeder [1]. El problema con estos difusores radica en que para conseguir dicha difusión en baja frecuencia, hacen falta espesores del orden de medio metro, lo cual no resulta adecuado para instalar en muchos espacios arquitectónicos. Como respuesta a ello aparecen los difusores basados en cristales de sonido (SCSD), los cuales pueden producir scattering a baja frecuencia con menores espesores [2]. A través de la continua investigación presente en esta materia, aparecen también los SCSD optimizados [3], creados a partir de algoritmos genéticos, los cuales producen una mejor respuesta en baja frecuencia que los SCSD no optimizados.

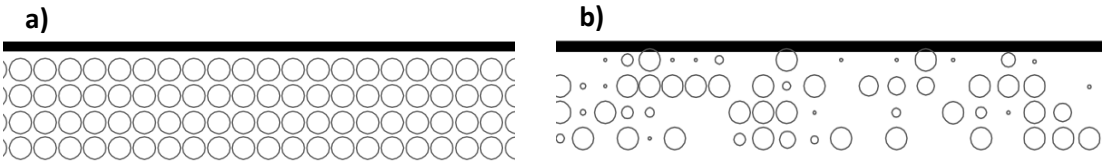



Figura 1. a) SCSD no optimizados. b) SCSD optimizados

En el presente trabajo se pretende estudiar la influencia de dichos difusores sobre una pequeña sala de 4,2x4,2 metros. Para llevarlo a cabo se utiliza la técnica FDTD, mediante la cual se simula la sala en 2 dimensiones en 3 situaciones distintas: con las paredes lisas, con SCSD no optimizados y con SCSD optimizados (para más detalles de la técnica utilizada véase por ejemplo [4]). El objetivo es calcular la respuesta impulsiva de las 3 salas para poder estudiar sus parámetros de difusión objetivos y sus parámetros subjetivos mediante una encuesta a músicos profesionales, pudiendo auralizar el sonido de un fagot dentro de cada una de las 3 salas. Para dicha auralización y para el cálculo del IACC simularemos una cabeza acústica con un micrófono a cada lado a modo de oído. Para el resto de parámetros se colocan 16 micrófonos omnidireccionales y 16 direccionales. El método utilizado para obtener dicha respuesta impulsiva es el Exponential Sine Sweep con un barrido hasta los 5000 Hz.

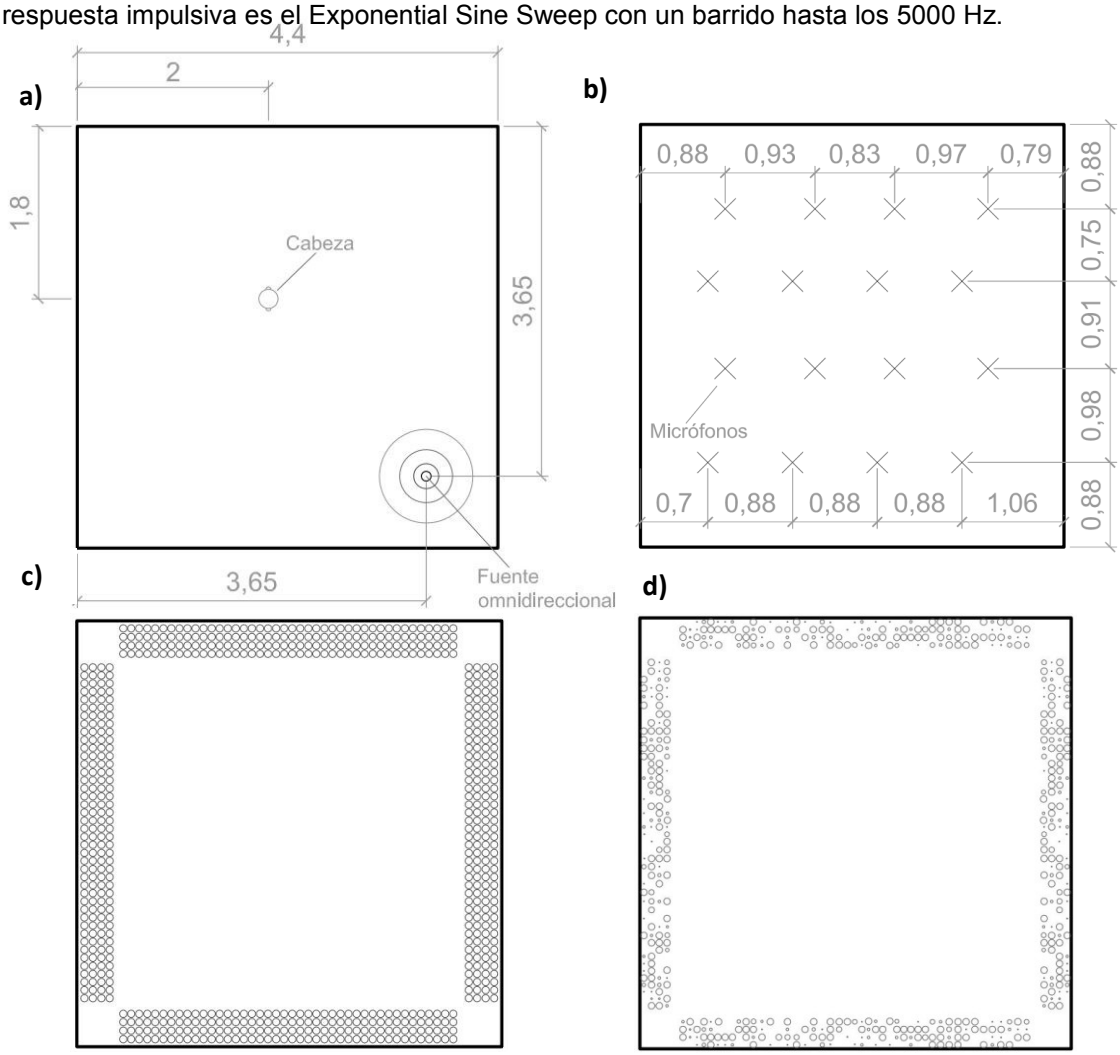


Figura 2. a) Medidas de la sala, posición de la fuente acústica y posición de la cabeza acústica; b)Colocación de los distintos micrófonos; c)Sala con los SCSD no optimizados colocados ; d) Sala con los SCSD optimizados colocados

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- MEDICIONES OBJETIVAS

Los parámetros acústicos estudiados son el EDT, el T60, la Definición, el C80, el C50, el Tr1, el brillo y la calidez [5]. Los resultados son los siguientes:

| Parámetros acústicos | Sin difusores | SCSD convencionales | SCSD optimizados | Unidades |
|---|---|---|---|---|
| EDT | 0,51 | 0,30 | 0,27 | Segundos |
| T60 | 0,57 | 0,38 | 0,30 | Segundos |
| BR | 1,03 | 1,41 | 1,41 | Cociente |
| Br | 1,08 | 2,04 | 1,45 | Cociente |
| Tr1 | 1,05 | 1,44 | 1,03 | Cociente |
| C80 | 4,81 | 10,77 | 12,69 | dB |
| C50 | 2,86 | 5,82 | 8,00 | dB |
| D | -6,64 | -5,09 | -4,04 | dB |

Tabla 1. Resultados de los distintos parámetros acústicos

Como vemos en la Tabla 1, el tiempo de reverberación baja con el uso de los SCSD, especialmente con los optimizados, tanto en el EDT como en el T60. El brillo y la calidez aumentan también con el uso de SCSD, viendo el Tr1, vemos que la sala con difusores no optimizados resulta muy brillante, en cambio la sala con los difusores optimizados, siendo brillante, resulta más equilibrada. En lo que se refiere a la claridad, tanto musical como de palabra, esta aumenta con el uso de SCSD, especialmente los optimizados. Lo mismo ocurriría con la definición.
Excepto en el caso del brillo y la calidez, no podemos afirmar que los SCSD mejoren los parámetros acústicos estudiados, ya que su idoneidad dependerá del tipo de música que se interprete o reproduzca en dicha sala.

Además de dichos parámetros acústicos tradicionales se estudian los siguientes parámetros acústicos indicadores del grado de difusión [6]:

- Desviación del TR: Desviación estándar del tiempo de reverberación en los distintos puntos medidos de cada sala. A mayor desviación, menor difusión.
- Coloración: Desviación estándar entre los valores discretos de frecuencia de cada banda de tercio de octava en el total de los micrófonos de la sala.
- Factor de energía lateral (LEF): Coeficiente que expresa la relación entre la energía recibida por micrófonos omnidireccionales y direccionales.
- Eficiencia Energética (CEE):Medida similar al LEF, siendo un coeficiente obtenido mediante la comparación de micrófonos de distintas direccionalidades.
- Correlación cruzada interaural (IACC): Medido simulando una cabeza acústica, calcula un coeficiente que expresa el parecido entre las señales recibidas por los 2 oídos. Se puede estudiar con distintos intervalos temporales. En este caso se estudia el IACC early y el IACC late
- Linealidad de las curvas de caída: Coeficiente que compara la similitud entre las curvas de caída por frecuencias con una recta.

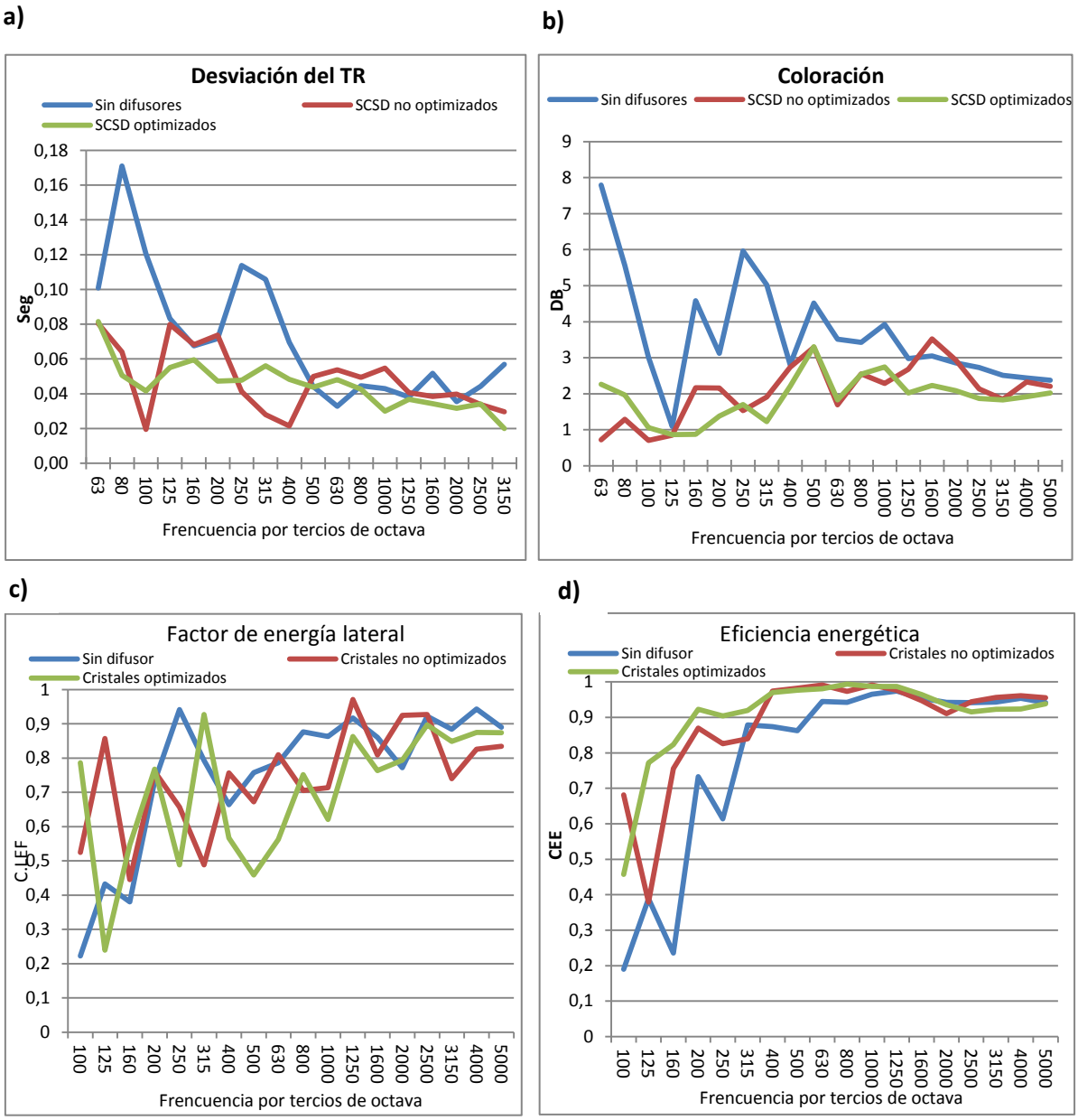



Figura 3. a) Resultados de la desviación del tiempo de reverberación; b)Resultados de la coloración; c)Resultados del factor de energía lateral (LEF); d)Resultados de la eficiencia energética (CEE).

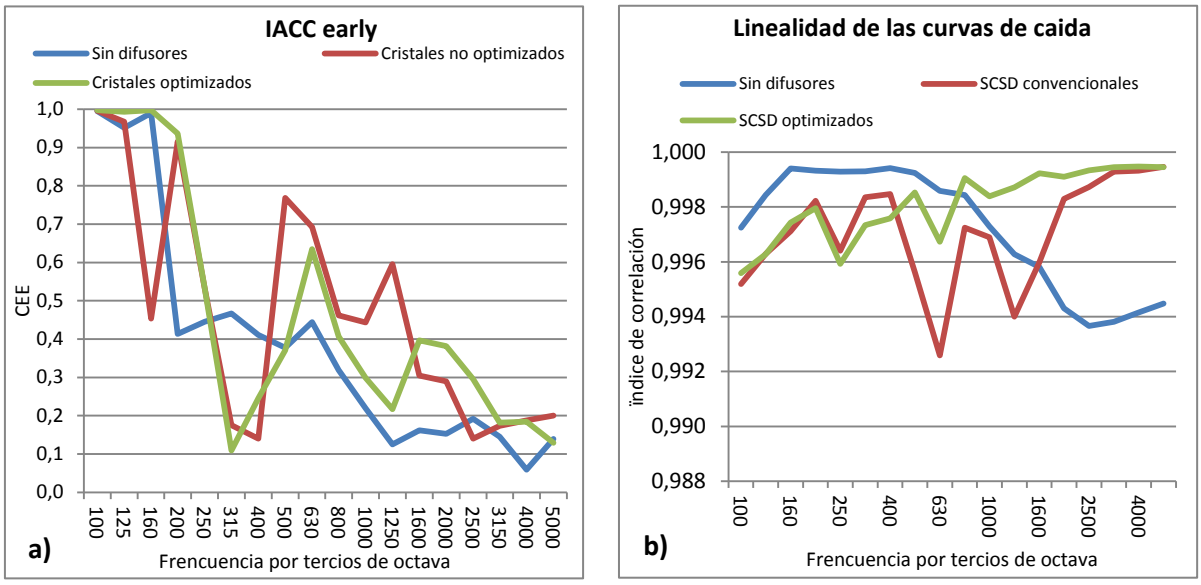



Figura 4. a) IACC early; b) Resultados de la linealidad de las curvas de caida;

Mediante la observación de las tablas de resultados de los distintos parámetros, podemos ver que los resultados de la sala con SCSD optimizados destacan en la mayoría de ellos, seguidos por los SCSD no optimizados, sobretodo en bajas frecuencias, donde como ya se ha comentado, es donde la actuación de estos difusores resulta importante. En el único parámetro donde no observamos mejor resultado con el uso de difusores es en la correlación de las curvas de caída hacia una recta, donde la sala sin difusores resulta ser la que mejores resultados obtiene. A modo de resumen, resulta interesante realizar la media en baja frecuencia (hasta 400 Hz) de los resultados de cada parámetro:

| MEDIA BAJA FRECUENCIA | Sin difusores | SCSD convencionales | SCSD optimizados |
|---|---|---|---|
| Coloración de la señal | 4,33 | 1,56 | 1,51 |
| Desviación del rt | 0,10 | 0,06 | 0,05 |
| IACC early | 0,67 | 0,60 | 0,69 |
| IACC late | 0,59 | 0,43 | 0,65 |
| LEF | 0,59 | 0,64 | 0,62 |
| CEE | 0,56 | 0,76 | 0,82 |
| Curvas de caida | 0,99891 | 0,99715 | 0,99687 |

Mejor resultado
2º Mejor resultado

Tabla 2. Media en baja frecuencia de los resultados de los parámetros de difusión.

Como ya se podía entrever en las tablas, únicamente 2 parámetros de los 7 medidos, no otorgan mejores resultados en la sala con SCSD optimizados, como son la linealidad de las curvas de caída, en la cual tienen los peores resultados y en el LEF, donde los SCSD no optimizados, obtienen los mejores resultados seguidos por la sala con SCSD optimizados.

– MEDICIONES SUBJETIVAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de datos extraídos de 20 encuestas realizadas a músicos profesionales, los cuales valoraron una serie de parámetros perceptivos (redondez, riqueza armónica, claridad, nitidez y brillo) en diferentes salas con y sin SCSD. En la Figura 5 se compara la variabilidad de cada parámetro en función de la sala con la desviación estándar representando en el eje de ordenadas la valoración de los sujetos (del 1 al 10) y en el eje de abcisas las diferentes salas: la Sala 1 hace referencia a la sala sin SCSD, la Sala 2 a la sala con SCSD no optimizados y la Sala 3 a la sala con SCSD optimizados. Así, se representa el valor medio otorgado por los sujetos para cada sala y para cada uno de los parámetros y la desviación estándar (representada como un segmento vertical).

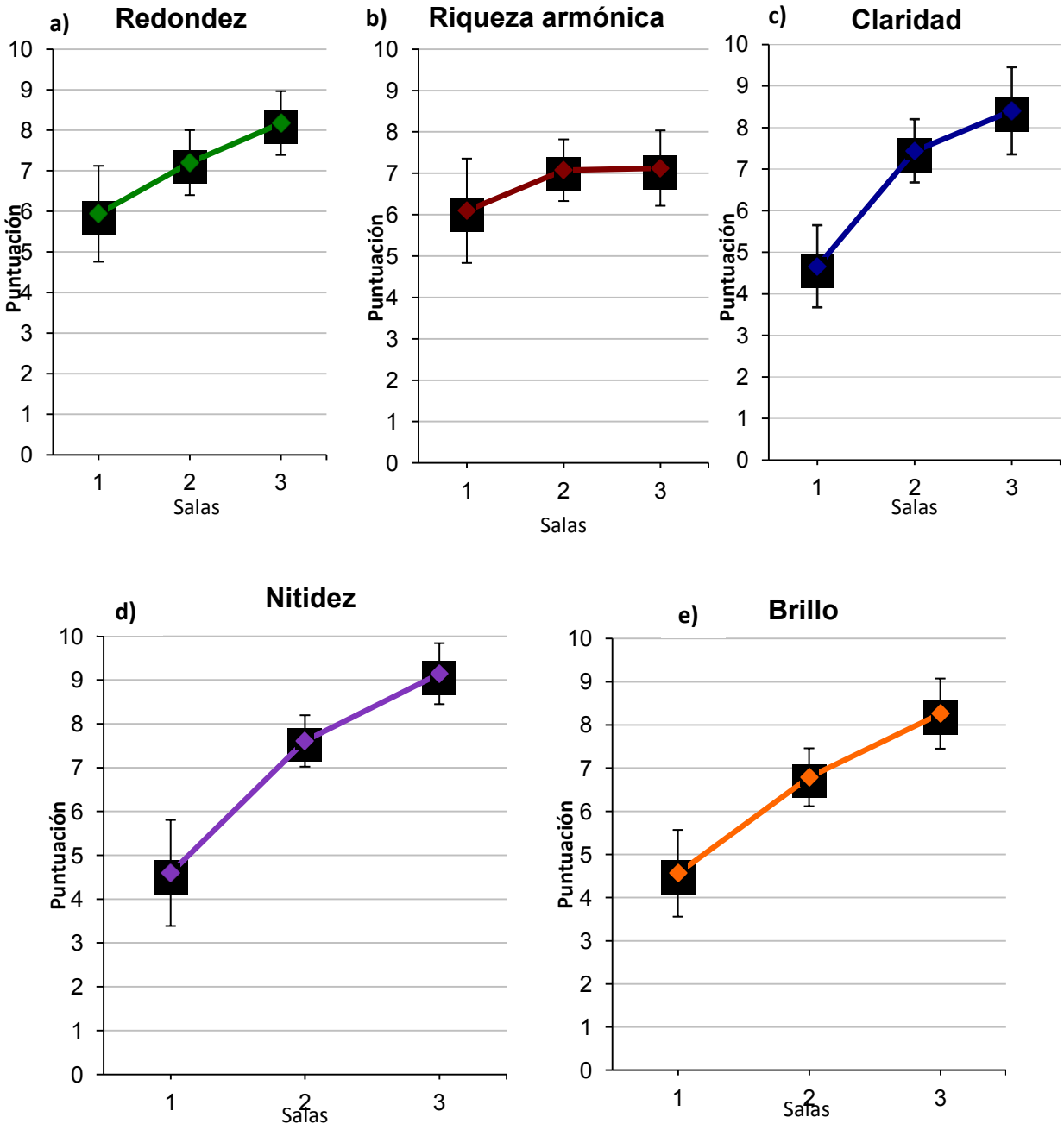


Figura 5. Resultados de los parámetros subjetivos. a) Redondez; b) Riqueza armónica; c) Claridad; d) Nitidez; e) Brillo

Para cada uno de los parámetros acústicos evaluados, se observa que los valores otorgados por los sujetos son superiores en las salas con SCSD. En los casos de la claridad, el brillo y la nitidez, se aprecia claramente que la introducción de SCSD en la sala afecta mejorando la percepción de estos tres parámetros. Sin embargo, la desviación estándar indica que las valoraciones otorgadas para los SCSD optimizados y para los no optimizados son bastante similares, por lo que no se puede saber con certeza qué difusores mejoran la percepción de estos parámetros. Únicamente en el caso de la nitidez, se observa de forma clara que los SCSD optimizados mejoran este parámetro respecto de los no optimizados. En el caso de la redondez y la riqueza armónica, los valores medios y la desviación estándar indican que las valoraciones por parte de los sujetos son muy similares y muy dispersas, por lo que no se puede afirmar con certeza que la introducción de SCSD en la sala mejore estos dos parámetros.

También se les preguntó a los sujetos la sala preferida en lo que a sonido general percibido se refiere. La Figura 6 muestra los resultados de esta pregunta:

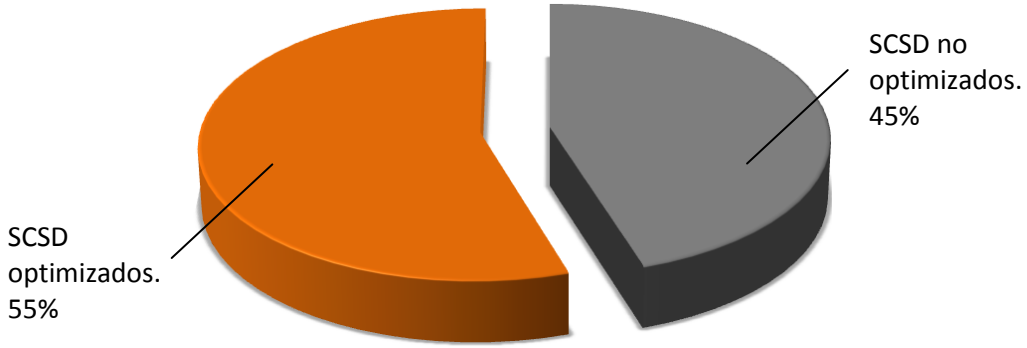



Figura 6. Resultados de los parámetros subjetivos sobre la sala favorita de los encuestados.

Como se observa en la Figura 6, ninguno de los encuestados optó por la sala sin difusores, lo cual indica que la introducción de SCSD en la sala proporciona un mejor sonido general en la misma. No obstante, no existe una gran diferencia de porcentaje entre la sala con SCSD optimizados y la sala con SCSD no optimizados. Para llegar a unas conclusiones más fiables, sería necesario realizar una encuesta a un número mayor de músicos profesionales entrenados.

## CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

A través de los resultados obtenidos tanto en los parámetros subjetivos como objetivos, es posible alcanzar diversas conclusiones:

- El uso de SCSD tiene un efecto notable en los parámetros de difusión de una sala en baja frecuencia, sobretodo en el caso de los optimizados, mejorando todos los parámetros de difusión medidos excepto la linealidad de las curvas de caída a la sala sin difusores.
- El uso de difusores basados en cristales de sonido puede ayudar a mejorar ciertos parámetros acústicos, tales como el Brillo, la calidez, la claridad y la definición en una sala.
- La incorporación de SCSD en una sala puede ser percibida claramente por oyentes entrenados. Los cuales han experimentado mejora en todos los parámetros a nivel medio respecto a la sala sin difusores siendo especialmente notorio en los resultados

de la claridad, el brillo y la nitidez. En el caso del brillo y la nitidez, también resulta apreciable la diferencia entre los SCSD optimizados y los no optimizados. No se puede afirmar así mismo, que el uso de SCSD mejore la redondez del sonido y su riqueza armónica. Sería necesario una muestra mayor de músicos para llegar a mayores conclusiones.

- De los músicos encuestados, ninguno de ellos ha elegido como mejor sala a aquella sin difusores, siendo una mayoría aquellos que prefieren los SCSD optimizados. Siendo esta solo una diferencia del 10%, sería necesario realizar la encuesta a un número mayor de músicos para sacar conclusiones más válidas al respecto.
- En una valoración general entre parámetros objetivos y subjetivos, se puede concluir que los SCSD optimizados, obtienen los mejores resultados de manera general, seguidos de cerca en la mayoría de parámetros por los SCSD no optimizados.

Como líneas futuras de investigación se plantean las siguientes:

- Profundización sobre el efecto de los SCSD en salas de mayor tamaño y de distintas tipologías
- Ampliación de los parámetros subjetivos a estudiar añadiendo nuevos y aumento de la muestra estudiada de músicos profesionales para discernir con claridad el límite de la mejora sobre el oyente de parámetros tales como la redondez o la riqueza armónica.
- Ampliación de dicha encuesta a oyentes no entrenados, pudiendo usar distintos estilos y piezas musicales observar los efectos sobre los distintos tipos de instrumentos. Con ello se podría comprobar si verdaderamente las diferencias pueden ser percibidas por todo tipo de público, lo que serviría para valorar si realmente la introducción de SCSD en determinados recintos donde se practica música produce una mejora claramente perceptible de la calidad acústica de la sala.
- Valorar la posibilidad de conseguir realizar simlaciones en 3D usando lenguajes de programación basados en GPU, los cuales podrína reducir drásticamente el tiempo de cálculo que resulta necesario en Matlab.

**REFERENCIAS**

[1] M.R. Schroeder, “Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences”, J. Acoust. Soc. Am. 57, No. 1, 149-150 (1975).

[2] Redondo, J.; Picó Vila, R. ;Sánchez-Morcillo, V. ; Woszczyk, W “Sound diffusers based on sonic crystals”. JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA.13 (44412 – 4412) 2013

[3] J. Redondo, J. V. Sánchez-Pérez, X. Blasco, J. M. Herrero & M. Vörlander, “Optimización de difusores acústicos basados en cristales de sonido” Tecniacústica 2015 (Valencia-Spain)

[4] J. Redondo, R. Picó, B. Roig and M. R. Avis, Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes, Acta Acustica united with Acustica 93, 4, 611-622, (2007)

[5] UNE-EN ISO 3382(2001): Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. (ISO 3382:1997).

[6] Spring, N. F.; Randall, K. E., The measurement of sound diffusion index in small rooms. Research Dep., Engineering Div., BBC, Kingswood Warren ; 1969

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CUALIFICACIÓN ACÚSTICA DE UNA CÁMARA DE TRANSMISIÓN VERTICAL DE DIMENSIONES REDUCIDAS

**Navacerrada, Mª Ángeles; Pedrero, Antonio; Fernández, Marta; Díaz, César.**
Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, UPM, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

PACS: 43.55.Br

**Resumen**
En el laboratorio de Acústica y Vibraciones de la ETS de Arquitectura UPM se ha construido una cámara de transmisión vertical de dimensiones reducidas con fines de investigación y docencia. Dispone de una abertura de ensayo de área 7,5 $m^2$, sobre la que se ha instalado una losa de hormigón de 140 mm de espesor. Los volúmenes de las salas superior e inferior son 13,2 $m^3$ y 11,8 $m^3$ respectivamente. En este trabajo se muestran los ensayos realizados en la caracterización de la cámara siguiendo las directrices generales indicadas en las Normas UNE-EN ISO 10140-3 y 5: 2011.

**Abstract**
In the Acoustics and Vibrations Laboratory of the School of Arquitecture of the Polytechnic University of Madrid it has been built a vertical transmission chamber of reduced dimensions for research and teaching activities. The chamber is provided of an opening test area of 7,5 $m^2$, on which a concrete slab 140 mm thick has been installed. The volume of the upper and lower rooms are 13,2 $m^3$ and 11,8 $m^3$ respectively. In this work we show the test conducted on the characterization of the chamber following the general guidelines specified in the standards UNE-EN ISO 140-3 and 5: 2011.

## INTRODUCCIÓN

La norma UNE-EN ISO 10140-5[1] especifica los requisitos que deben cumplir las instalaciones de laboratorio para la medición del aislamiento a ruido de impactos de forjados y revestimientos de suelos según los procedimientos descritos en las normas UNE-EN ISO 10140-3 [2] y UNE – EN ISO 10140-1 [3] respectivamente. Entre ellos que el volumen de la sala receptora no debe ser inferior a 50 $m^3$ y se recomienda que el tamaño de la abertura de ensayo para suelos esté entre 10 y 20 $m^2$, con la arista más pequeña no inferior a 2,3 m. Además, se debe garantizar que el aislamiento acústico a ruido aéreo entre los recintos receptor y emisor sea suficientemente alto como para que el campo sonoro medido en el recinto receptor sea sólo el generado por la excitación de los impactos sobre el suelo bajo ensayo. Sin embargo, construir una cámara de estas características es costoso y se debe disponer de dicho espacio. Por ello en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid se planteó la construcción de una cámara de transmisión vertical de dimensiones reducidas. Los recintos que la componen se han construido cuidando los detalles de aislamiento acústico. A partir de aquí es primordial conocer las cualidades acústicas de los recintos, medición del tiempo de reverberación y la difusión sonora. En este trabajo se presenta una caracterización preliminar de las mismos.

## DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA

La cámara de transmisión vertical se compone de dos recintos verticalmente adyacentes, el superior es el recinto emisor y el inferior el recinto receptor. El tamaño de la abertura de ensayo es de 7,5 $m^2$ con una longitud de la arista más corta de 2,1 m. El volumen del recinto receptor es de 11,8 $m^3$ y el volumen del recinto emisor es 13,2 $m^3$. El forjado separador consiste en una

losa maciza de hormigón de 140 mm de espesor. Un croquis de la cámara de transmisión vertical así como fotos de los dos recintos que la componen se muestra en la figura 1.



**Recinto emisor (o superior)**



**Recinto receptor (o inferior)**

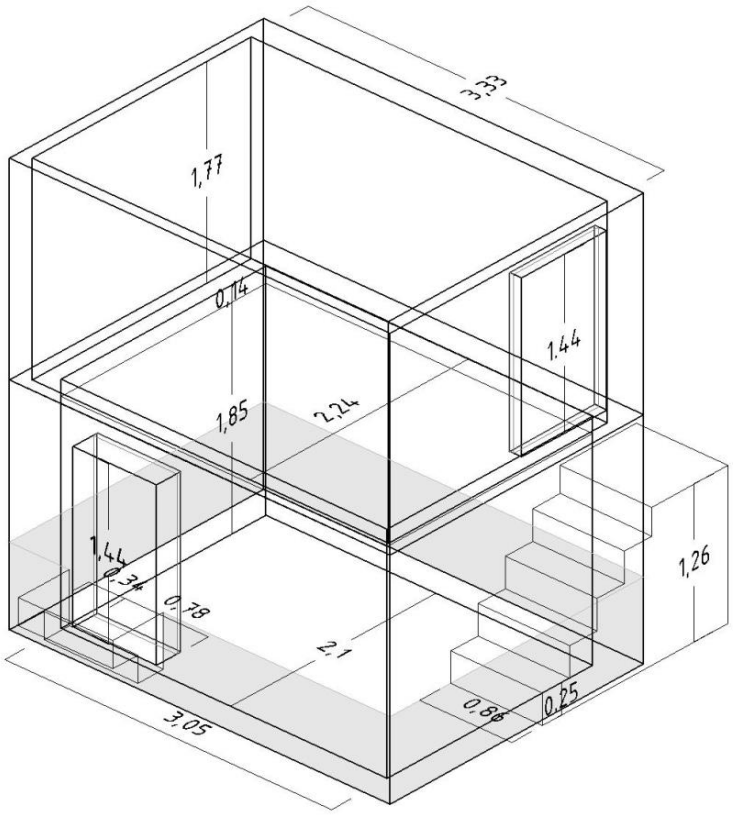



**Figura 1**. Fotos y croquis de la cámara de transmisión vertical del Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la ETSAM

## MEDICIONES Y RESULTADOS

La norma UNE-EN ISO 140-5 [1] especifica las características geométricas y acústicas de las instalaciones del laboratorio para las mediciones de aislamiento al ruido de impactos. A pesar del tamaño reducido de los recintos que componen nuestra cámara vertical es recomendable cumplir los requisitos que sobre el campo acústico recoge dicha norma y que son los siguientes:

- El tiempo de reverberación en los recintos no debería ser excesivamente largo o corto. Así a frecuencias de y por encima de los 100 Hz el tiempo de reverberación no debería sobrepasar los 2 s y no ser inferior a 1 s.
- Campo sonoro difuso: grandes variaciones en el nivel de presión sonora en los recintos indican la presencia de ondas estacionarias fuertes dominantes.
- Sin transmisiones indirectas: el sonido transmitido por cualquier vía indirecta debería ser insignificante comparado con el sonido transmitido a través del elemento de ensayo. Un modo de conseguir esto es proporcionar un aislamiento estructural suficiente entre el recinto emisor y el recinto receptor.
- Que los procedimientos de medida den una repetibilidad satisfactoria.

Partiendo de estos supuestos se empieza la caracterización y el proceso de rediseño si fuese necesario.

**Tiempo de reverberación (T)**

Las mediciones en el interior de cada uno de los dos recintos, emisor y receptor, se han llevado a cabo mediante el método de ruido interrumpido. Se han tomado un total de ocho caídas en cada uno de los recintos para una sola posición de fuente, dos mediciones en cada una de las cuatro posiciones microfónicas establecidas distribuidas de manera aleatoria por todo el espacio útil de los mismos. A partir de las mediciones es posible promediar el valor del tiempo de reverberación T para cada banda de frecuencia, determinar la desviación estándar de estos valores, y adicionalmente registrar los gráficos de las caídas de nivel. Una mala difusión acústica se refleja en las curvas de decaimiento, esto conlleva que las caídas de tiempo de reverberación no sean lineales y los resultados sean diferentes. A muy bajas frecuencias, las cámaras de ensayo con superficies duras tienden a tener tiempos de reverberación altos, en este sentido habría que modificar la absorción del recinto. En la Tabla I se muestran los resultados de las mediciones: promedio del tiempo de reverberación y desviación estándar. Para ambas cámaras la desviación estándar es mayor a bajas frecuencias, en las bandas de alta frecuencia la desviación es menor. En la figura 2 se comparan los valores promedios medidos para T en ambos recintos con el intervalo recomendado por la UNE-EN ISO 10140-5. Los valores de T son mayores que 2 s a bajas frecuencias extendiéndose este rango hasta los 630 Hz en el caso del recinto receptor.

| | Recinto receptor (o inferior) | | Recinto emisor (o superior) | |
|---|---|---|---|---|
| **Frecuencia (Hz)** | **Promedio T** | **Desviación estándar** | **Promedio T** | **Desviación estándar** |
| **100** | 3,18 | 0,06 | 2,78 | 0,04 |
| **125** | 2,86 | 0,17 | 2,24 | 0,10 |
| **160** | 2,46 | 0,06 | 2,33 | 0,08 |
| **200** | 2,24 | 0,13 | 1,97 | 0,15 |
| **250** | 2,86 | 0,16 | 1,48 | 0,11 |
| **315** | 2,73 | 0,16 | 1,41 | 0,17 |
| **400** | 2,37 | 0,15 | 1,23 | 0,05 |
| **500** | 2,05 | 0,13 | 1,14 | 0,05 |
| **630** | 2,08 | 0,17 | 1,19 | 0,10 |
| **800** | 1,83 | 0,08 | 1,06 | 0,06 |
| **1000** | 1,75 | 0,11 | 1,10 | 0,03 |
| **1250** | 1,59 | 0,10 | 1,15 | 0,02 |
| **1600** | 1,44 | 0,04 | 1,14 | 0,03 |
| **2000** | 1,44 | 0,02 | 1,12 | 0,04 |
| **2500** | 1,32 | 0,03 | 1,11 | 0,02 |
| **3150** | 1,20 | 0,02 | 1,04 | 0,04 |
| **4000** | 1,07 | 0,03 | 0,96 | 0,02 |
| **5000** | 0,92 | 0,02 | 0,84 | 0,01 |

**Tabla I.** Valor promedio del tiempo de reverberación en los recintos receptor y emisor y desviación Estándar de las mediciones llevadas en cabo en cada una de las posiciones de micrófono.

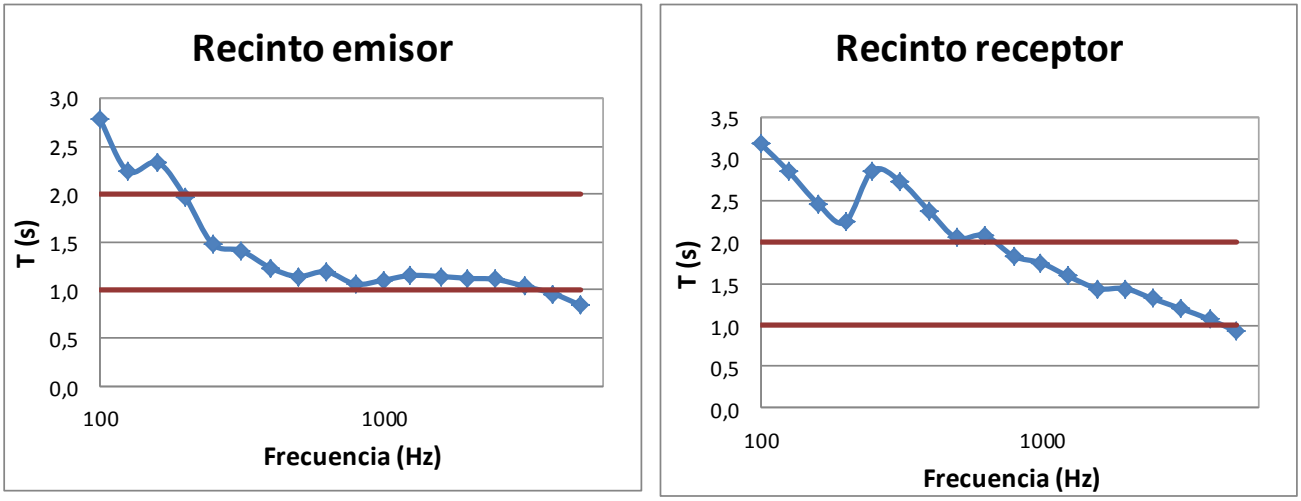



**Figura 2.** Tiempos de reverberación promedios medidos en los recintos emisor y receptor. La líneas rojas establecen el intervalo recomendado por la norma UNE-EN ISO 10140-5.

### Difusividad del campo sonoro

La difusión del campo sonoro está garantizada por la uniformidad de la presión sonora en todos los puntos del espacio de una sala. La norma UNE-EN ISO140-14 [4] describe un procedimiento de evaluación del campo sonoro. Para la medida del grado de difusión del campo sonoro en las cámaras se han llevado a cabo mediciones del nivel de presión sonora con micrófonos fijos en nueve posiciones diferentes distribuidas uniformemente. En cada posición se ha llevado a cabo la medición del nivel de presión sonora a dos alturas diferentes y para dos posiciones de la fuente sonora.

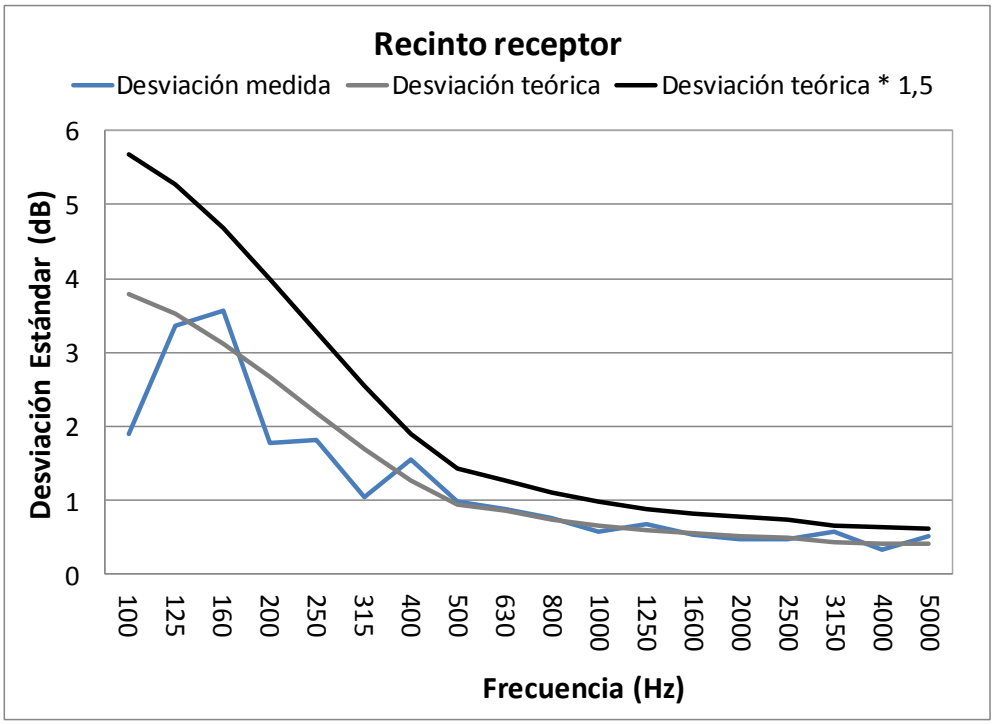



**Figura 3. Recinto receptor.** Desviación estándar para el nivel de presión sonora medido en las distintas posiciones de micrófono. Las alturas de medida han sido 0,70 y 1,20 m. En el gráfico se ha representado el valor teórico propuesto por la norma UNE EN ISO 140-14 para un volumen de 15 $m^3$ para mediciones in situ y dicho valor por un factor de 1,5.

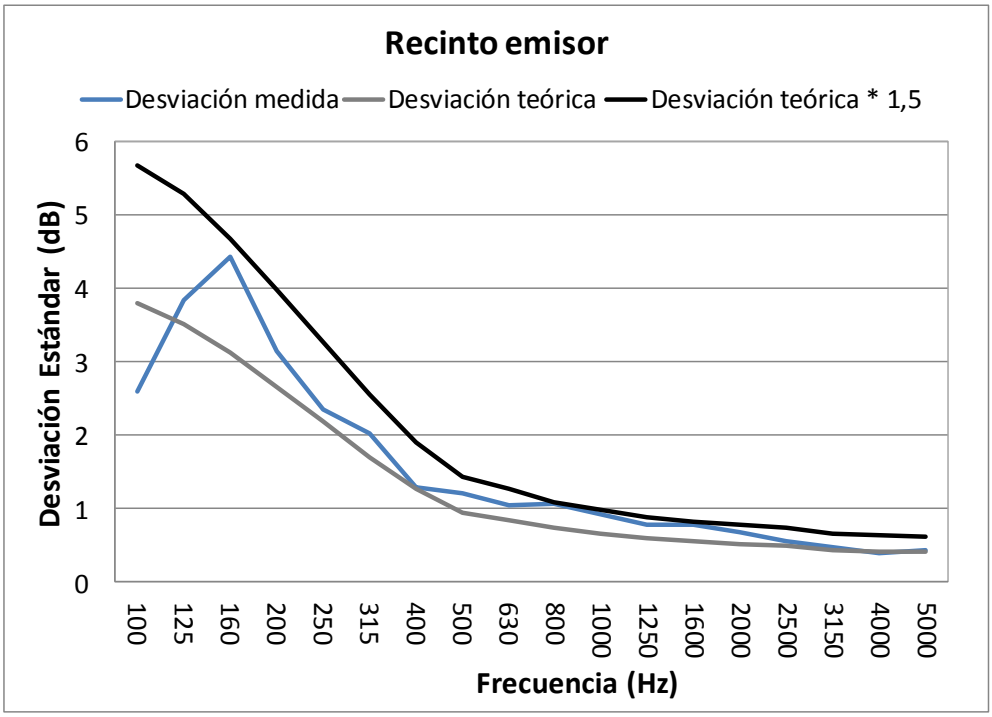



**Figura 4. Recinto emisor.** Desviación estándar para el nivel de presión sonora medido en las distintas posiciones de micrófono. Las alturas de medida han sido 0,50 y 1 m. En el gráfico se ha representado el valor teórico propuesto por la norma UNE EN ISO 140-14 para un volumen de 15 $m^3$ para mediciones in situ y dicho valor por un factor de 1,5.

En las figuras 3 y 4 para ambos recintos, se compara la desviación estándar de los niveles de presión sonora con la desviación teórica propuesta en la norma UNE-EN ISO 140-4 [4] para un volumen de 15 $m^3$. Estos valores, establecidos para mediciones *in situ*, son orientativos para optimizar los recintos y no se deben considerar como exigencias que se deban cumplir. Se recomienda que los valores teóricos propuestos para la desviación estándar no sean superados en un factor de 1,5. En las figuras 3 y 4 se ha incluido la curva del valor teórico de la desviación estándar por un factor de 1,5. En ningún caso los valores calculados superan esta curva. No obstante, para los dos recintos se ha medido la desviación estándar más alta para la frecuencia de 160 Hz. Debido a que son recintos muy pequeños las ondas estacionarias o modos de resonancia pueden ser un problema. En el siguiente apartado se estudian los modos de resonancia para ambas cámaras siguiendo el criterio de Bonello [5].

**Modos propios**

En la figura 5 se muestra el número de modos, hasta orden tres, para cada banda de frecuencia. Esta gráfica es coincidente para ambos recintos, no obstante se ha incluido una tabla que recoge las frecuencias exactas a las que se producen los modos propios hasta la banda de 160 Hz. La geometría de los recintos emisor y receptor es rectangular lo que no proporciona una distribución modal homogénea a bajas frecuencias y se aprecia en la forma de la curva especialmente en el decaimiento que en el número de modos se produce en las bandas de 160 y 400 Hz. Se han incluido tablas con los valores de la frecuencia de corte, fc, calculada a partir de la expresión $f_c = \frac{c}{2L_{max}}$ y que se define como el primer valor de frecuencia modal que se genera en una determinada sala e indica el inicio de la unidad acústica de la sala. Se ha indicado también la frecuencia de Schroeder $f_{Sch} = 2000\sqrt{\frac{T}{V}}$ , que limita inferiormente el rango en que se puede considerar el campo acústico difuso.

| | Emisora | Receptora |
|---|---|---|
| **fc** | 52 Hz | 56 Hz |
| **fSch** | 582 Hz | 767 Hz |

| Frecuencias resonancia (Hz) | |
|---|---|
| R. emisor | R. receptor |
| 55,7 | 55,7 |
| 75,9 | 81,0 |
| 94,2 | 91,9 |
| 96,0 | 98,3 |
| 111,0 | 107,5 |
| 111,5 | 111,5 |
| 122,4 | 122,5 |
| 134,5 | 134,6 |
| 134,9 | 137,8 |
| 147,1 | 144,5 |
| 151,8 | 161,9 |
| 161,7 | 165,6 |
| 165,6 | 167,2 |
| 167,2 | 171,2 |

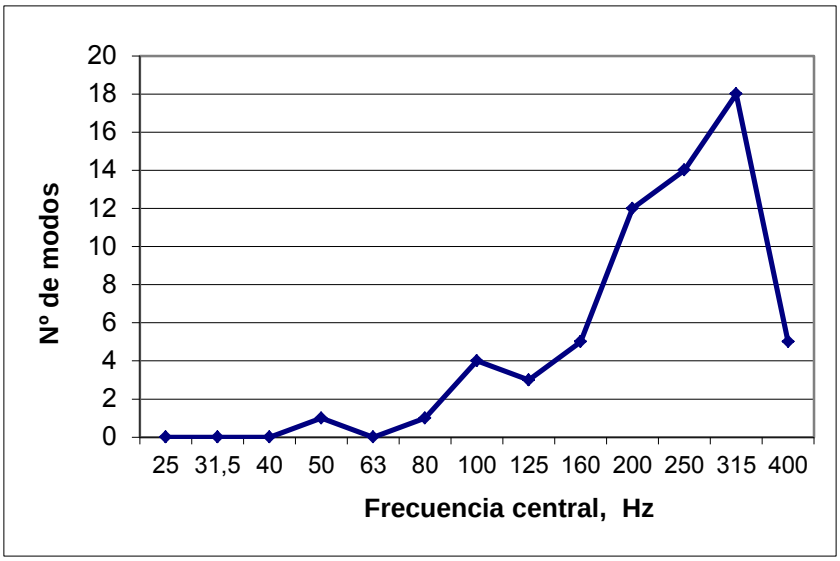



**Figura 5.** Número de modos para los recintos emisor y receptor. En las tablas se ha indicado la frecuencia de corte y la de Schroeder para ambos recintos y el valor exacto de las frecuencias de las ondas estacionarias hasta la banda de 160 Hz.

### Nivel de aislamiento y Ley de reciprocidad

El sistema debe garantizar un buen nivel de aislamiento. En la figura 6 se representa el índice de reducción sonora R medido desde 50 Hz siguiendo el método de bajas frecuencias descrito en la norma UNE-EN ISO 16283-1 [6]. Además el sonido radiado por transmisiones indirectas debe ser despreciable comparado con el sonido radiado por el suelo sometido a ensayo. Que se cumpla la ley de reciprocidad sirve para mostrar que no hay trasmisiones indirectas. En laboratorio, en el caso de forjados homogéneos desnudos y sin transmisiones forzadas, se han determinado las relaciones experimentales entre el índice de reducción acústica R y el nivel de presión acústica de impactos normalizado, Ln. Esto permite estimar el nivel de presión acústica de impactos normalizado a partir del conocimiento de los valores del índice de reducción acústica R del mismo. Esta relación es la siguiente en bandas de tercio de octava:

$$R + L_n = 38 + 30\ lg \frac{f}{(1Hz)}$$

donde f es la frecuencia central de la banda de frecuencia en Hercios. En la Figura 7 se comparan los valores medidos y la expresión teórica mostrando, en general, buena coincidencia.

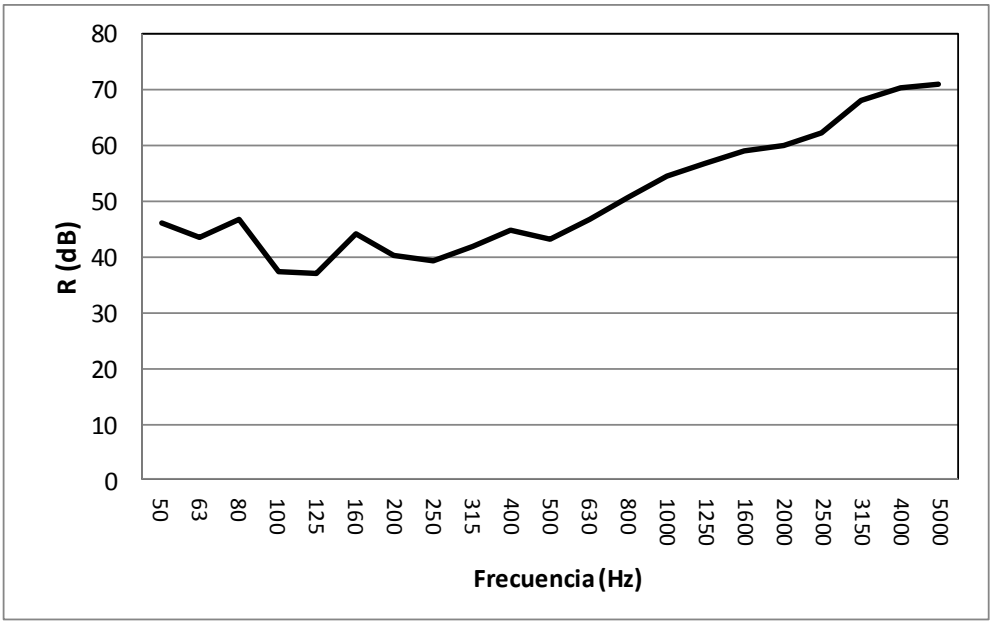



**Figura 6.** Índice de reducción sonora R del forjado separador de la cámara de transmisión vertical.

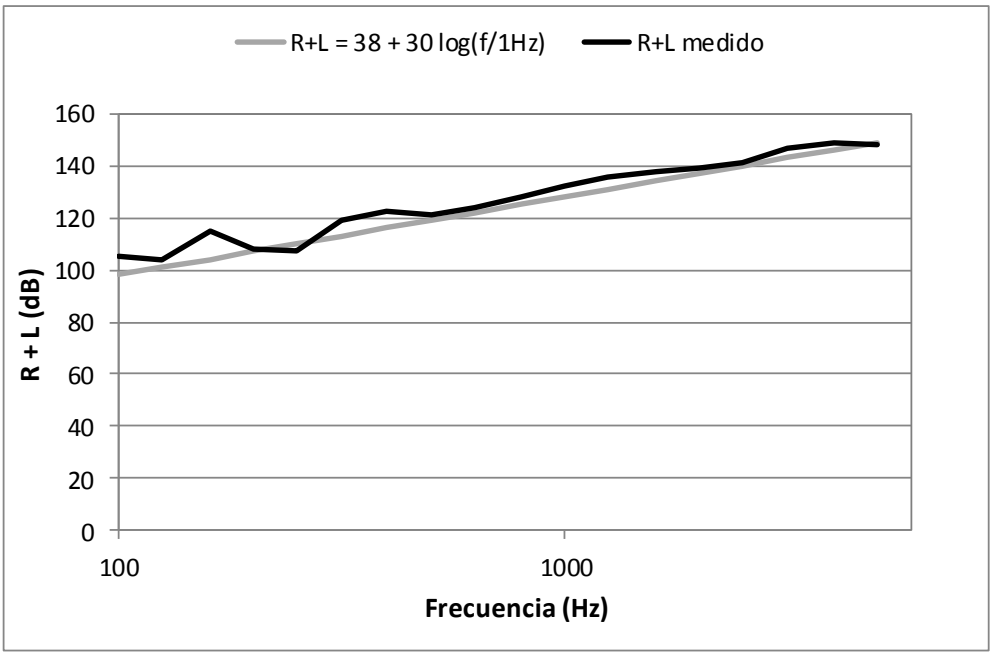



**Figura 7.** Comparación R+L medido y la ley de reciprocidad para forjados homogéneos.

### Repetibilidad del procedimiento de medida

Se han llevado a cabo cinco mediciones según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 101040-3 [2] bajo condiciones de repetibilidad. La fuente de ruido de impactos se ha colocado en cuatro posiciones diferentes aleatorias sobre el suelo de ensayo. Se han utilizado cuatro posiciones diferentes de micrófono repartidas por todo el espacio permitido en la cámara de medida y se han realizado seis medidas del nivel de presión sonora. La desviación típica de estas cinco mediciones repetidas debe ser menor que los valores indicados en la norma UNE-EN ISO 12999-1 [7]**.** En figura 8 los valores obtenidos se comparan con los valores máximos

indicados en la norma, las desviaciones están por debajo de lo indicado por la norma excepto para la banda de 400 Hz banda para la que se producía un descenso en el número de modos.

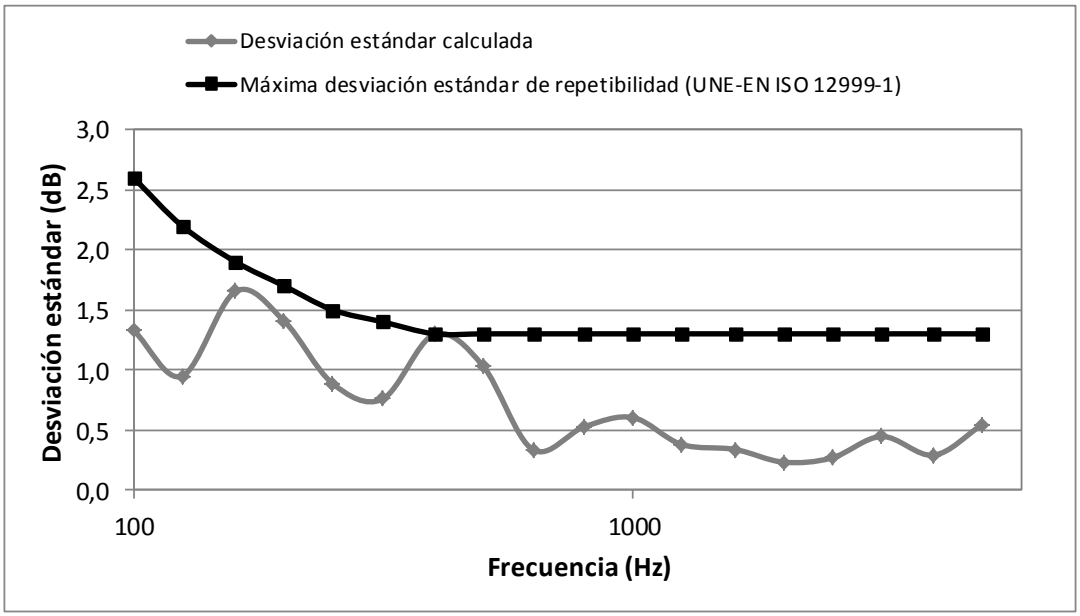



**Figura 8.** Comparación de la desviación estándar de repetibilidad de ensayos de aislamiento a ruido de impacto y el valor máximo propuesto por la norma UNE-EN ISO 12999-1.

## CONCLUSIONES

En bandas de baja frecuencia no deben esperarse condiciones de campo difuso en los recintos de medida especialmente cuando se consideran volúmenes pequeños. En vista de los resultados derivados de la caracterización preliminar de los recintos que componen la cámara de ensayo algún tratamiento es necesario para conseguir mejoras en su comportamiento acústico. Estas mejoras deben ir orientadas principalmente a modificar los valores del tiempo de reverberación y mejorar la difusión sonora.

## REFERENCIAS

**[1] UNE-EN ISO 10140-5 (2011).** Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.
**[2] UNE-EN ISO 10140-3 (2011).** Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos.
**[3] UNE-EN ISO 10140-1 (2011).** Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos.
**[4] UNE-EN ISO140-14 (2005).** Acústica. Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción. Parte 14: Directrices para situaciones especiales *in situ*.
**[5]** Bonello O. J., A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes, J. Audio Eng. Soc. 29 (9), 1981, pp. 597-606.
**[6] UNE-EN ISO 16283-1(2015).** Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.
**[7] UNE-EN ISO 12999-1(2015).** Acústica. Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1: Aislamiento acústico.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO DE UN SENSOR ACÚSTICO - PIEZOELÉCTRICO CON ENCAPSULADO METÁLICO

PACS 43.38; 43.40; 43.58

J. Barreiro[1], A. Sáenz de Inestrillas [1], and F. Camarena[1]
[1]Universitat Politècnica de València.
Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres.
* EPSG. C/Paranim 1
46730 Grau de Gandia.
E-mail: fcamarena@fis.upv.es

## ABSTRACT

A methodology to design and characterize a piezoelectric transducer in reception that works in audible range between 1 KHz to 10 KHz is proposed. A piezoelectric ceramic is forced to operate outside of its own piezo-acoustic resonance frequencies, but getting signal when it is attached to thin metal plate through natural resonance frequencies of the system or Eigenfrequencies, which are defined from input parameters such as Young Modulus, Poisson coefficient, material densities and the equations that described the vibrations in plates. This calculation procedure is later validated by FEM simulations and contrasted with the manufacturing and sensitivity measurements of some designs.

## RESUMEN

Se propone una metodología de diseño y caracterización en recepción de un transductor piezoeléctrico, operando en rango audible entre 1KHz y 10KHz, obligando a una cerámica piezoeléctrica a trabajar por fuera de sus frecuencias propias de resonancia piezo-acústicas, pero obteniendo señal cuando la misma es unida a una placa metálica de poco espesor, a través de las frecuencias naturales de resonancia del sistema, las cuales están definidas a su vez a partir de parámetros de entrada como el módulo Young, coeficiente de Poisson, densidades de material y las ecuaciones que describen las vibraciones en placas. Este procedimiento de cálculo es posteriormente validado con simulación por elementos finitos y contrastado con la fabricación de algunos diseños de transductores.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En determinadas condiciones, como puede ser en presencia de atmósferas explosivas o entornos en los que se requiera una baja densidad de campos electromagnéticos, disponer de un micrófono cuya carcasa exterior funcione como una jaula de Faraday, es decir, impidiendo la emisión de campos electromagnéticos al exterior durante el proceso de conversión de energía acústica en energía eléctrica, es la única opción para poder realizar medidas de caracterización sonora. En un micrófono de condensador[i] [ii], el principio de funcionamiento

consiste, precisamente, en aprovechar las vibraciones producidas por las ondas acústicas en una placa metálica, sin embargo, esta placa debe de ser de un grosor muy pequeño (micras), lo que lo convierte en un sensor demasiado delicado para ciertos entornos y, además, estos micrófonos necesitan pre-polarización, lo que es completamente contraproducente para trabajar en atmósferas explosivas. Por otra parte, lo tradicionales micrófonos electromagnéticos son difíciles de encapsular, y su sensibilidad se vería considerablemente mermaba en el mejor de los casos. Otros sistemas de transducción electroacústicos más modernos, como son los transductores ópticos y mems (sistemas microelectromecánicos) [iii] [iv] resultan bastante interesantes, pero el alto costo en componentes electrónicos para la transmisión y procesamiento de señal, así como la dificultad para operar con ellos, hacen que sean descartados en la práctica.

En el presente trabajo se propone la utilización de cerámicas piezoeléctricas para fabricar un sensor acústico, el cual no involucra en su construcción complejos componentes electrónicos (de ahí su bajo costo), no requieren voltajes de polarización externos, sus componentes mecánicos son de fácil manipulación y mecanizado, y pueden ser fácilmente encapsulados. Las aplicaciones de este tipo de transductores están enfocadas principalmente al campo de los ultrasonidos [ref], pues las propiedades electromecánicas y mecánicas-acústicas de las cerámicas piezoeléctricas fijan sus frecuencias propias de resonancia en dicho rango espectral, lo que define un rango de sensibilidad plana a frecuencias por encima de los 20 KHz. Además, este tipo de sistemas suele utilizarse para la construcción de hidrófonos (sensores acuáticos), debido a que existe una mejor compatibilidad de sus impedancias acústicas (cerámica-agua), favoreciendo la transmisión o recepción de señales, que en el caso del aire. Sin embargo, en este trabajo se propone la construcción de un transductor piezoeléctrico encapsulado operando en aire en el rango audible entre 1 KHz y 10 KHz (es decir, un micrófono piezoeléctrico). Para ello, se forzará a la cerámica piezoeléctrica a trabajar por fuera de sus frecuencias propias de resonancia mecano-acústicas, y se obtendrá la señal eléctrica a través de las frecuencias de resonancias mecánicas del sistema, esto es, la oscilación de una placa circular que forma parte del encapsulado o jaula de Faraday.

En el apartado 2 se expondrán los principios físicos que explican el funcionamiento vibracional de membranas fijas a través de las propiedades mecánicas de un material, como son el módulo de Young, coeficiente de Poisson y densidades de material. Posteriormente, a través del método de elementos finitos, se realizará un estudio más exhaustivo del funcionamiento del sistema total propuesto, teniendo en cuenta las propiedades piezoeléctricas de la cerámica utilizada, de modo que se obtengan curvas de sensibilidad aproximadas del sistema dependiendo del tamaño tanto de la placa metálica como de la cerámica acoplada. Una vez realizados los diseños finales a través de la simulación, en el apartado final, se detallan y comparan los resultados experimentales obtenidos tras la construcción de dos sensores de diferentes dimensiones, y se discute acerca de los resultados obtenidos en cuanto a la validación de modelos por simulación y su uso para un caso aplicado a la detección de espectros estrechos de señal en rango audible.

## 2. MODELO FÍSICO DEL DISEÑO PROPUESTO

La restricción del encapsulamiento metálico del sensor y la decisión de utilizar cerámicas piezoeléctricas como material activo fuerza a la utilización de un diseño para nuestro sensor muy específico. Por un lado, este diseño debe de permitir que seamos capaces de registrar las vibraciones producidas en el encapsulamiento por la onda acústica, y por otro, debemos de poder registrar señales de baja frecuencia [entre 1 y 10 KHz]. Sin embargo, las cerámicas piezoeléctricas que pueden utilizarse para construir un sensor de estas características tienen asociadas frecuencias naturales de oscilación muy por encima de los 10 KHz, (modos de trabajo en espesor, radial, longitudinal, transversal o cizalla de una cerámica piezoeléctrica), lo cual implica que la respuesta plana del micrófono estaría bastante alejada del rango audible que es de nuestro interés.

Con el fin de cumplir con ambos requisitos se propone utilizar la propia vibración de una parte del encapsulamiento (la placa circular frontal, ver Fig. 1) para deformar la cerámica piezoeléctrica, que estaría adherida mediante una resina rígida a la placa.

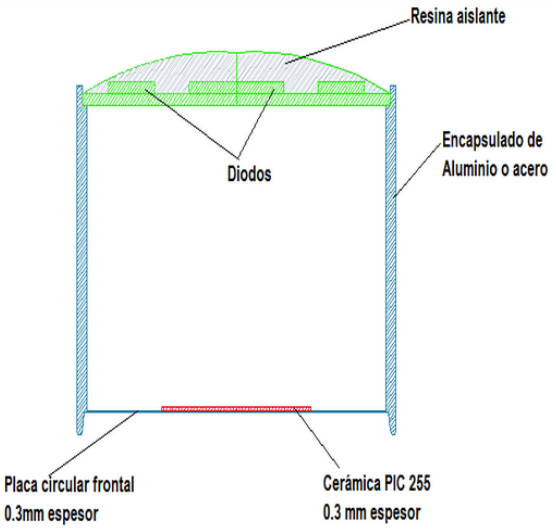



Figura 1.- Esquema del diseño de sensor piezoeléctrico propuesto

Las frecuencias propias de oscilación de una placa metálica circular sujeta por su extremo exterior puede calcularse analíticamente [v]. Estas frecuencias dependen de la rigidez de la propia placa, así como de la densidad volumétrica del material y sus dimensiones, y viene dada por la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{g_n{}^2}{2\pi} \frac{d}{\sqrt{12}} \left(\frac{\gamma}{\rho(1-\sigma^2)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde $f_n$ es la frecuencia del modo $n$ en Hertzios, $d$ es el espesor de la placa en m, $\gamma$ es el módulo de Young del material medido en Pa, $\rho$ es la densidad volumétrica del material en kg/m$^3$, $\sigma$ es el coeficiente de Poisson, y $g_{n\approx\frac{n\,\pi}{\alpha}}$ donde $\alpha$ es el radio de la placa en metros. Los valores de este último parámetro surgen de la condición de contorno exigida (nodo en *r=a),* que exigen que $sgn(J_0(ga)) \neq sgn(J_1(ga))$ donde $J_0$ y $J_1$ son las funciones de Bessel primer y segundo orden respectivamente. Para el primer modo de vibración $ga = 3.20$ .

Considerando una placa metálica de aluminio de grosor $d = 0.3\,mm$ y radio $r = 10\,mm$, el primer modo de resonancia de la placa estaría en $f_0 = 7598\,Hz$ Hz, que está en el rango audible de nuestro interés. Suponiendo que una onda de esta frecuencia producirá deformaciones importantes en la placa circular de aluminio, nuestra hipótesis es que estas deformaciones se transmiten a la cerámica piezoeléctrica adherida a la placa y nos permitirán obtener una señal eléctrica. Esta hipótesis será comprobada numérica y experimentalmente en los próximos apartados.

## 3. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

### 3.1 Frecuencias de resonancia

Pese a que la expresión (1) nos permite obtener el valor de la frecuencia a la que la placa circular del encapsulado vibra en su modo fundamental, es necesaria una simulación del dispositivo para estimar el efecto de la cerámica adherida a la placa, así como para determinar el valor de la sensibilidad del sensor.

Como herramienta de simulación por elementos finitos se escoge Comsol Multiphysics con los módulos mecánico y piezoeléctrico[vi]. Esta simulación consta de dos etapas. En la primera se realiza, a partir de las propiedades mecánicas y geométricas de los materiales involucrados en el sensor, una simulación de modos propios (Eigenfrequency ) [vii] del sistema, de forma que se puede determinar el valor de la frecuencia de resonancia de la placa circular frontal del dispositivo con la cerámica adherida (Ver Fig. 2).

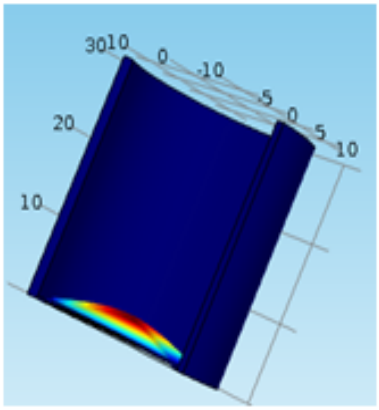



Figura 2.- Primer modo de oscilación del sensor

En la Figura 3 se pueden observar los resultados correspondientes a la frecuencia fundamental de oscilación del sensor a partir de la expresión analítica (1), expresión que no tiene en cuenta el efecto de la cerámica adherida, y a partir del resultado obtenido en la simulación FEM, en el cual sí que se ha tenido en cuenta el efecto de dicha cerámica. Se ha considerado una placa de aluminio con una densidad de 2700 kg/m3, módulo de Young de 70e9 Pa, un coeficiente de Poisson de 0.33, un espesor que varía entre 0.1 - 0.5 mm, y un radio variable entre 10.0 - 19.0 mm. La cerámica adherida sería una PI Ceramics  PIC 255 , de radio 10.0 mm y grosor 0.3 mm.

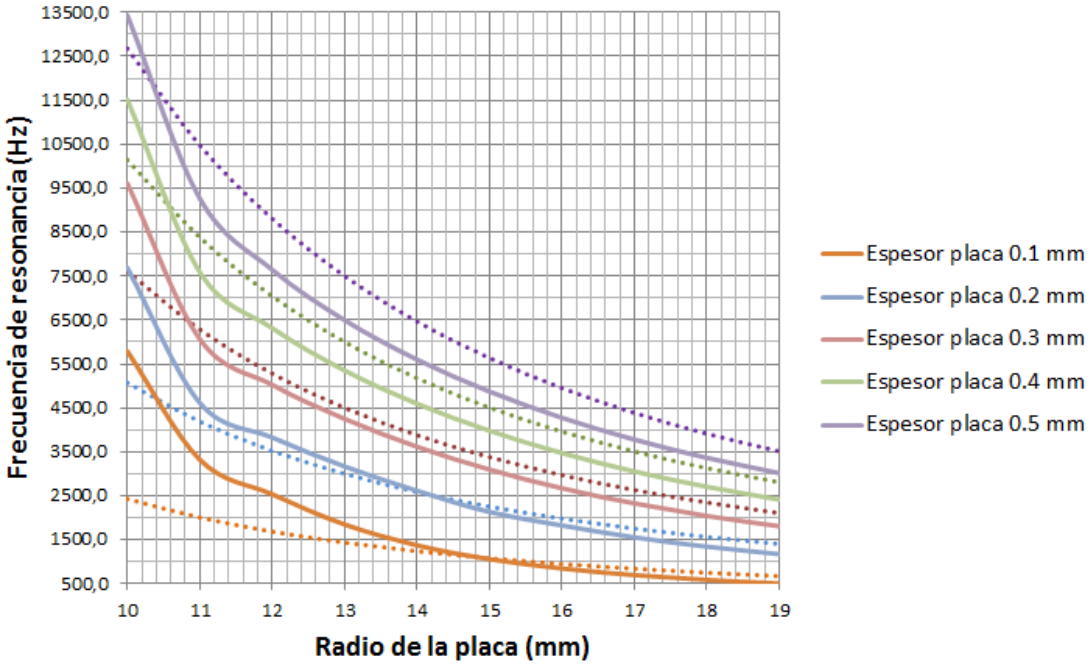



Figura 3.- Frecuencias de resonancia  obtenidas por simulación de una placa circular de aluminio, con una cerámica adherida de 10 mm de radio y 0.3 mm de espesor, cuando se varía su radio y su espesor. Las líneas punteada representan los resultados obtenidos con la fórmula (1).

De la Figura 3 se observan dos comportamientos cuando se comparan los resultados obtenidos en simulación con los datos obtenidos de la expresión (1). El primer caso a destacar es cuando (radio) $a_{placa} = a_{cerámica}$, donde el sistema total comprende una sola masa de un solo espesor. Debido a esto, la frecuencia de resonancia aumenta drásticamente con respecto al modelo teórico como se puede ver en la Figura 3. Se puede observar cómo el sistema resuena conforme la placa o la cerámica aumentan su participación en su peso total. Para algunas configuraciones, la cerámica es la que más aporta masa al sistema y conforme la placa aumenta de radio y de espesor, es esta última la que comienza a tener relevancia.

La segunda zona de análisis comienza conforme el radio de la placa aumenta con respecto al radio de la cerámica, es decir $a_{placa} > a_{cerámica}$. Dentro de este supuesto, pueden distinguirse dos situaciones en cada curva: una primera donde los datos obtenidos en simulación están por encima de los obtenidos a través de la expresión (1), y una segunda donde el sistema simulado obtiene valores por debajo de los valores calculados mediante la misma fórmula. En la primer subzona, el efecto de la cerámica sigue siendo significativo debido al tamaño de la misma con respecto al de la placa metálica, con lo que la vibración corresponde al sistema compuesto, que es de mayor grosor, por lo que la frecuencia fundamental aumenta. Sin embargo, existe un determinado punto para cada grosor de placa, donde ésta tiene un tamaño lo suficientemente grande como para que el sistema se comporte como una placa que tiene cierta masa adherida, lo que resulta en una disminución de la frecuencia de resonancia del sistema (en la Figura 3 se muestra el punto de cruce para cada grosor de placa). Cabe destacar que el punto de cruce se encuentra en radios grandes cuando el grosor de la placa es menor que el de la cerámica, mientras que conforme el grosor de la placa va aumentando, incluso superando el de la cerámica, el punto de cruce sucede en radios de placa inferiores.

### 3.2 Sensibilidad

La segunda etapa de la simulación involucra las propiedades piezoeléctricas de la cerámica y los materiales de encapsulado (acero o aluminio) [viii], para que con una perturbación, en este caso una presión sobre la placa del transductor, se pueda determinar el voltaje que el mismo ofrece, y de esta forma poder ser capaces de obtener la sensibilidad.

Se contempla un modelo donde como parte de la geometría se tiene en cuenta el encapsulado, la placa frontal, la cerámica y terminales para medir una diferencia de potencial. Una deformación es producida por una condición de contorno de presión sobre la placa del encapsulado (boundary load), para calcular cuánto voltaje produce el sistema en un espectro entre 1KHz-10KHz, esto es, donde la placa del encapsulado tiene su modo natural de resonancia mecánico y donde la cerámica no tiene ningún modo de resonancia eléctrico. Esto último fue corroborado midiendo y simulando la sensibilidad de la cerámica Un esquema de las condiciones de contorno para este problema se muestra en la Figura 4.

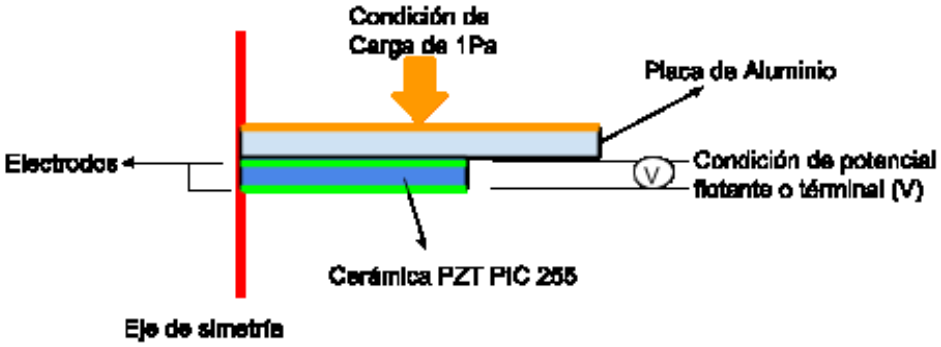



Figura 4.- Modelo simplificado de la simulación

Bajo el esquema anterior, la sensibilidad para diferentes radios de placa frontal sería la que se muestra en la Figura 5. Puede observarse cómo la sensibilidad de las colas a la izquierda de los picos aumenta cuando el diámetro de la placa de aluminio aumenta, y cómo los picos de máxima sensibilidad (resonancia) se desplazan hacia la izquierda. Así pues, si se desea optimizar la sensibilidad del sensor en frecuencias de 1 a 2 KHz, convendría utilizar radios de 1.8 a 2 cm, mientras que si se desea trabajar a frecuencias de 4 a 7 KHz, deberíamos bajar el radio de la placa frontal del sensor hasta valores de 1 a 1.2 cm.

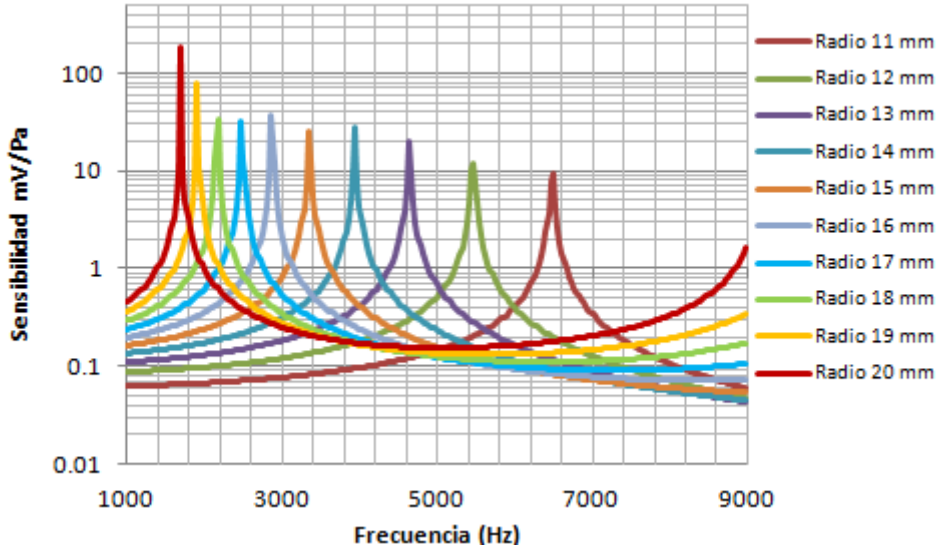



Figura 5. Simulación de la sensibilidad de diferentes diseños de hidrófonos. Espesor de cerámica constante 0.3 mm, con radio de cerámica fijo de 10 mm y radio de aluminio variable entre 10 y 20 mm, cuerpo cilíndrico de 39 mm de largo con un espesor de 1 mm

La Figura 6 muestra el efecto en la sensibilidad que se obtiene por el hecho de sustituir el material del sensor de aluminio por acero. La frecuencia de oscilación de la placa aumenta ligeramente (el acero posee un Módulo de Young mayor) y la sensibilidad decrece. Dos ejemplos para una configuración específica de sensor, placa de encapsulado de 15 mm y 17.5 mm de radio, manteniendo un espesor de 0.3 mm, y cerámica de 10 mm de radio y espesor de 0.3 mm.

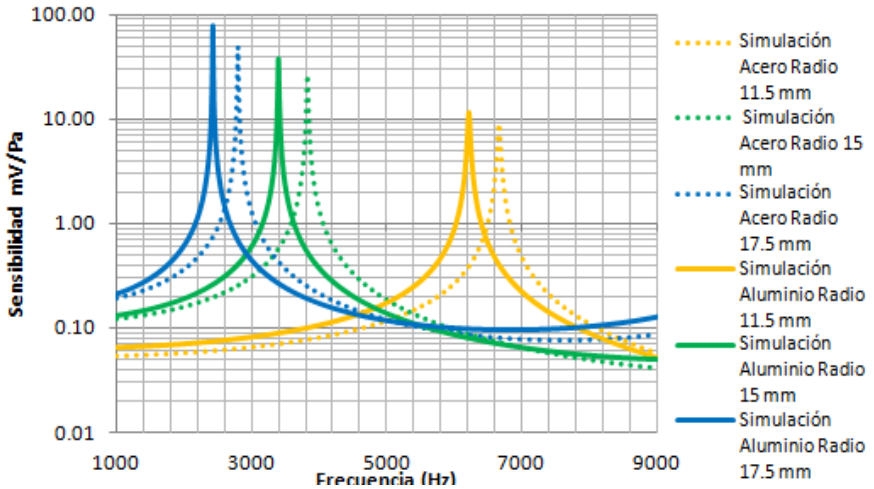



Figura 6. Comparativa de la sensibilidad obtenidas para una placa de 11.5 mm , 15 mm y 17.5mm de radio con materiales Acero o Aluminio. Cada configuración con una cerámica pegada de 0.3 mm de espesor y 10 mm de radio.

## 4. MEDIDAS EXPERIMENTALES DE SENSIBILIDAD

Para corroborar lo anterior, se han construido tres modelos con diferentes radios de placa con el fin de sintonizar sonidos a diferentes frecuencias de resonancia y poder contrastar su funcionamiento con los valores representados en la Figura 5. Las medidas escogidas fueron 11.5 mm, 15 mm y 17.5 mm de radio de placa. Todos los transductores tienen un espesor de placa de 0.3 mm y para cada dimensión se han fabricado un modelo en aluminio y otro en acero. Tanto la placa como el cilindro, son modelados en una sola pieza a través de CNC, siendo las dimensiones del cilindro 1 mm de espesor y 39 mm de alto.

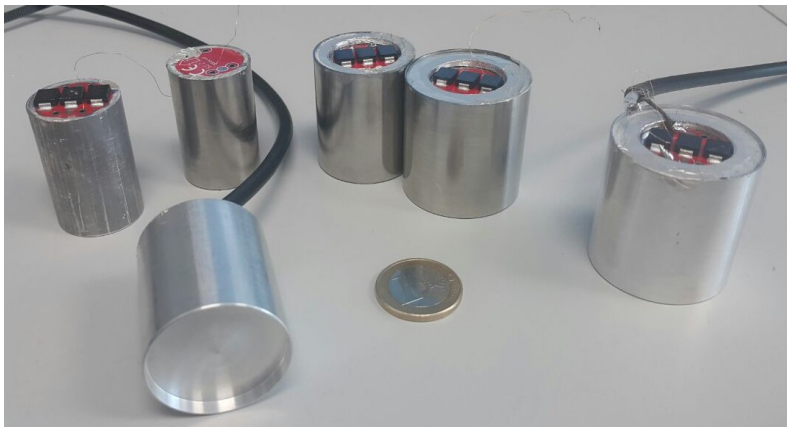


Figura 7. Diseños construidos de encapsulados tanto en aluminio como en acero

Para la medición de sensibilidad de los transductores se utilizó la técnica descrita en UNE-EN_61094-8=2013, con el método de sinesweep y respuesta al impulso enventanada. Dicha técnica permite comparar el sistema bajo medida respecto a uno calibrado y conocido. Como fuente emisora se utilizó un altavoz preamplificado de frecuencia plana, un micrófono calibrado y una cámara anecoica.

A continuación, en la Figura 8 se muestran las curvas de respuesta en frecuencia de los hidrófonos construidos tanto en aluminio como en acero realizando una comparativa con los resultados obtenidos en simulación para los modelos construidos.

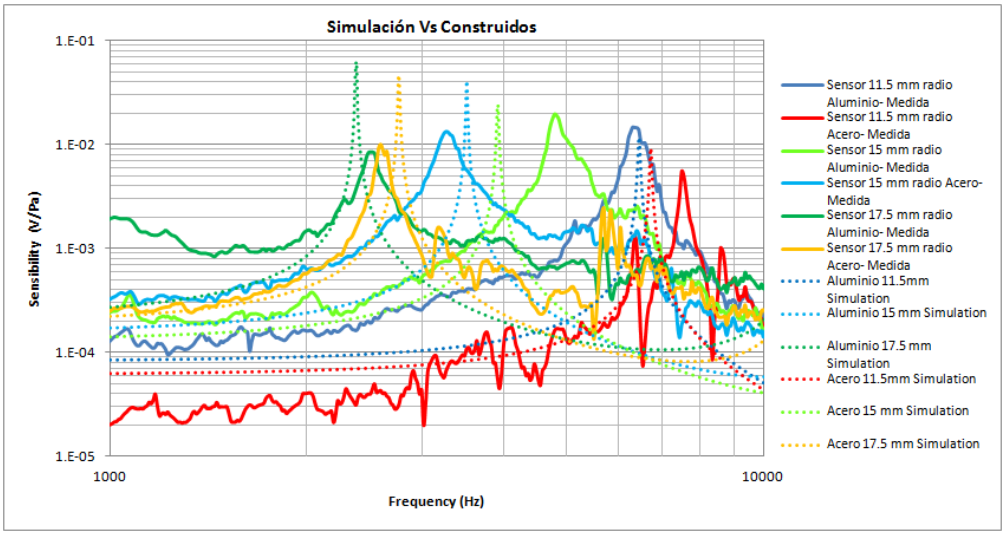



Figura 8. Gráfica de la sensibilidad y respuesta en frecuencia de los transductores construidos

Como se aprecia en la Figura 8, se puede ver como la frecuencia de máxima sensibilidad varía con respecto a los diámetros de los encapsulados. También con los pocos modelos

construidos, se puede apreciar ligeramente la influencia de cada material en dichos picos. Algunos valores se alejaron de los valores esperados, pero esto es debido al proceso de manufactura, donde la cantidad de epoxi a la hora de pegar la cerámica al encapsulado y los puntos de soldadura que unen los cables a los electrodos, no pueden ser variables controladas y por lo tanto tienen una repercusión importante en los resultados y que como lo demuestra la *Figura 3.* Cualquier variación en el espesor dentro de una tolerancia de 0.1mm, cambia la respuesta de trabajo del sensor. En cuanto al nivel de sensibilidad, a través de métodos de elemento finitos, con simulación puede hacerse una buena estimación de los niveles que se esperarán al construir los modelos, para de esta forma tener caracterizado el sistema antes de construirlo, pero esto dependerá de una buena caracterización de la cerámica en sus especificaciones técnicas y en sus coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas.

## 5. CONCLUSIONES

A través de este trabajo se describe una metodología para diseñar transductores piezoeléctricos encapsulados para realizar estudios acústicos en ambientes donde micrófonos convencionales no podrían trabajar, ya sea por sus características mecánicas o electromagnéticas. La teoría de vibración en placas ha sido empleada, demostrando que una cerámica piezoeléctrica adherida a una placa metálica de menor espesor, entregue una diferencia de potencial producto de la deformación mecánica del modo fundamental de resonancia de la placa.

La Ecuación 1 se acerca bastante a la hora de realizar una primera aproximación al diseño de este tipo de sensores. Sin embargo, esta forma no da resultados exactos, ya que además de la placa metálica, el sistema está conformado por una cerámica piezoeléctrica adherida, lo que puede modificar drásticamente la frecuencia fundamental de resonancia del sistema y de allí a que sea necesaria una implementación por elementos finitos.

También fue posible obtener una aproximación de la sensibilidad esperada del sistema contemplando los modelos y constantes piezoeléctricas haciendo uso de módulo Piezoeléctrico de Comsol Multiphysics. Pero sus parámetros de entrada a la hora de introducir los coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas, deben ser empíricamente ajustados, de lo contrario se pueden presentar inconsistencias en la amplitud en un orden de magnitud de 10.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[i] Ortega, Basilio Pueo, and Miguel Romá Romero. *Electroacústica: altavoces y micrófonos*. Pearson Educación, SA, 2003.
[ii] Eargle, John. *The microphone book*. Taylor & Francis, 2004.
[iii] Bakhoum, Ezzat G, and Marvin HM Cheng. "Advanced optical microphone." *Sensors Journal, IEEE* 14.1 (2014): 7-14.
[iv] Loeppert, Peter V, and Sung B Lee. "SiSonicTM–The first commercialized MEMS microphone." *Proceedings of the Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop* 4 Jun. 2006: 27-30.
[v] Kinsler, Lawrence E et al. "Fundamentals of acoustics." *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999.* 1 (1999).
[vi] "Piezoelectric Simulations with COMSOL Multiphysics." 2013. 7 Jun. 2015 <http://www.comsol.com/video/piezoelectricsimulations-comsol-multiphysics>
[vii] Humar, J. *Dynamics of structures*. CRC Press, 2012.
[viii] Lerch, Reinhard. "Simulation of piezoelectric devices by two-and three-dimensional finite elements." *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on* 37.3 (1990): 233-247.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# VALIDACIÓN DE APLICACIONES DE MÓVILES PARA LA MEDICIÓN DEL RUIDO

PACS: 43.50. Yw

Rubio-García, Álvaro O.[1]; Vílchez-Gómez, Rosendo[1]; Méndez-Sierra, Juan A.[1*]; Barrigón-Morillas, Juan M.[1]; Prieto-Gajardo, Carlos[1]; Rey-Gozalo, Guillermo[2]; Montes-González, David[1]; Atanasio-Moraga, Pedro[1].

[1] Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España
Tfno.: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03
E-mail: jmendez@unex.es

[2] Universidad Autónoma de Chile, 5 Poniente 1670,
3460000 Talca, Región del Maule, Chile;
E-mail: greyg@uautonoma.cl

## ABSTRACT

It is well known that there has been enormous growth in recent times of applications (*applets*) for smart*phones, tablets*, laptots, etc., each one with a different objective. A group of these applications allows us approximately to measure the noise as a professional sound level meter would make. The question is what level of accuracy has these applications? In this study eight current commercial applications have been selected and compared the results with those that offers a sound level meter 2250 Brüel & Kjær class 1. It has been made comparisons of pressure level measured in reverberation chamber. Also, it has been studied the directionality in open field, and the reverberation times in classrooms. The results show that not all applications are suitable for professional purposes.

## RESUMEN

Es de sobra conocido el enorme incremento que ha habido en los últimos tiempos de aplicaciones (*applets*) para móviles, *iphones, tablets*, etc…, cada una de ellas con un objetivo diferente. Un grupo de estas aplicaciones intenta medir el ruido aproximadamente tal y como lo haría un sonómetro profesional. La cuestión es, ¿qué grado de precisión presentan estas aplicaciones? En este estudio hemos tomado ocho aplicaciones comerciales corrientes y las hemos comparado con los resultados que ofrece un sonómetro 2250 Brüel & Kjær clase 1. Hemos hecho comparativas de nivel de presión medido en cámara reverberante, estudio de la direccionalidad en campo abierto, así como experimentos de comparación de tiempos de reverberación medidos en aulas de uso docente. Los resultados señalan que no todas las aplicaciones son tan fiables como para tener un uso profesional.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos cada vez son más frecuentes los teléfonos inteligentes o tabletas que cuentan con aplicaciones que podrían, quizás en un futuro, sustituir o aproximarse a los instrumentos originales empleados en los laboratorios para las medidas técnicas, científicas, o al menos para dar una idea aproximada de éstas, por ejemplo en ruido urbano en calle, o en el interior de recintos, simplificando así la necesidad de utilizar un único aparato técnico, a veces complicado de manejar, pesado o de gran volumen, o de rápido de consumo de baterías, por señalar algunos problemas. Entre todas las múltiples aplicaciones que podemos encontrarnos, las hay capaces de medir: nivel de presión sonora, espectro en frecuencia, tiempo de reverberación, vibraciones, etc. El problema surge cuando se quiere hacer un uso técnico de dichos dispositivos. ¿Cuál es su validez? ¿Con qué confianza podemos utilizarlos para hacer una primera aproximación?

Preguntas como las anteriores han empezado a hacérselas ya los científicos y técnicos, véase Kardous y Show [1], o Nast et al. [2], en cuyos artículos se empieza a indicar, quizás por primera vez, cómo hacer valoraciones de estas aplicaciones. Nosotros vamos a intentar lo mismo con las técnicas que señalan los autores mencionados anteriormente, sobre todo en lo que se refiere a la comprobación de los niveles de presión sonora. También hemos probado a diseñar un experimento para la medida de la directividad por un lado, y por otro para la medida del tiempo de reverberación.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Criterios de Selección de las Aplicaciones a Validar.

Hemos empleado los siguientes criterios: 1º) Que la aplicación mida nivel de presión sonora en decibelios, y con ponderación nula, y muestre el resultado de forma numérica con un decimal de precisión. 2º) Que la aplicación admita calibración en función de la frecuencia y del nivel de presión sonora. 3º) Que la aplicación sea controlable vía cable USB desde el portátil. Estas tres condiciones tienen que cumplirse a la vez para que la aplicación sea escogida.

| Imagen | Nombre | Fabricante | Gratis | Valoración del usuario | Experimento en el que se ha empleado |
|---|---|---|---|---|---|
|  | decibel Pro | BSB Mobile Solutions | No | 4.3 | a) Nivel Sonoro<br>b) Directividad |
|  | Noise Meter | Jinasys | Sí | 4.2 | a) Nivel Sonoro<br>b) Directividad |
|  | Sonómetro | Trila droid | Sí | 4.1 | a) Nivel Sonoro |
|  | Sound Meter | Borce Trajkovski | Sí | 3.8 | a) Nivel Sonoro |
|  | SPL Meter | Kewlsoft | Sí | 4.2 | a) Nivel Sonoro<br>b) Directividad |
|  | RT | AppAcoustiC | Sí | 3.9 | c) Tiempo Reverberación |
|  | Nachhallzeit | Kröber | No | 4.4 | c) Tiempo Reverberación |
|  | Tiempo de reverberación | BeatApp Studio | Sí | 3.3 | c) Tiempo Reverberación |

***Tabla 1:*** *Aplicaciones seleccionadas para las mediciones a realizar. (La valoración de los usuarios iba de 0 a 5 máximos)*

A su vez se han considerado tres posibles experimentos de comprobación: a) Comprobación del nivel sonoro en cámara reverberante, b) Directividad en campo libre, y c) Tiempo de Reverberación en aula docente.

Una vez tenidos en cuenta los criterios anteriores hemos seleccionado las aplicaciones mencionadas en la Tabla 1.

### Mediciones de Nivel de Presión Sonora en Cámara Reverberante

La Imagen 1 muestra el montaje experimental en la Cámara Reverberante de la Universidad de Extremadura, para la comparación de niveles de presión sonora emitidos por el altavoz omnidireccional. En

cuanto a montaje y distancias se han procurado seguir las recomendaciones de la norma ISO 1996-1,2 [3].



***Imagen 1:*** *Interior de la cámara reverberante de la Universidad de Extremadura (Escuela Politécnica, Cáceres) con los instrumento empleados en la medición.*

Montaje experimental: Pre-amplificador conectado a altavoz omnidireccional Brüel & Kjær para emitir tonos de frecuencia controlada, o bien ruido rosa o blanco. Smartphone Motorola Moto G Segunda Generación y Sonómetro 2250 completo Brüel & Kjær clase 1, montados ambos sobre trípodes a una altura de 1,5 metros sobre el suelo, y una misma distancia de separación respecto al altavoz de 2 metros. Ordenador portátil desde el que controlar altavoz, Smartphone y sonómetro. Cascos insonorizantes para el operador. Termómetro-psicrómetro digital para conocer la temperatura y humedad del aire. La distancia de los emisores o receptores ha sido siempre superior a 1,5 m respecto de cualquier objeto reflectante o pared.

**Mediciones de la Directividad de las Aplicaciones**

Lo comentado en el apartado anterior puede aplicarse también en las mediciones de directividad, véase montaje en Imagen 2. El montaje experimental es igual al de la cámara reverberante, pero en campo libre, evitando en la medida de lo posible toda reflexión [3]. En cada medida el sonómetro y el Smartphone giran paralelamente ángulos de 45º. Las mediciones fueron realizadas a partir del horario de cierre de las instalaciones (22:00 horas), para evitar fuentes de ruido ajenas a las medidas



***Imagen 2:*** *Vista exterior, para la realización de los experimentos de directividad, con igual equipamiento que en el apartado anterior.*

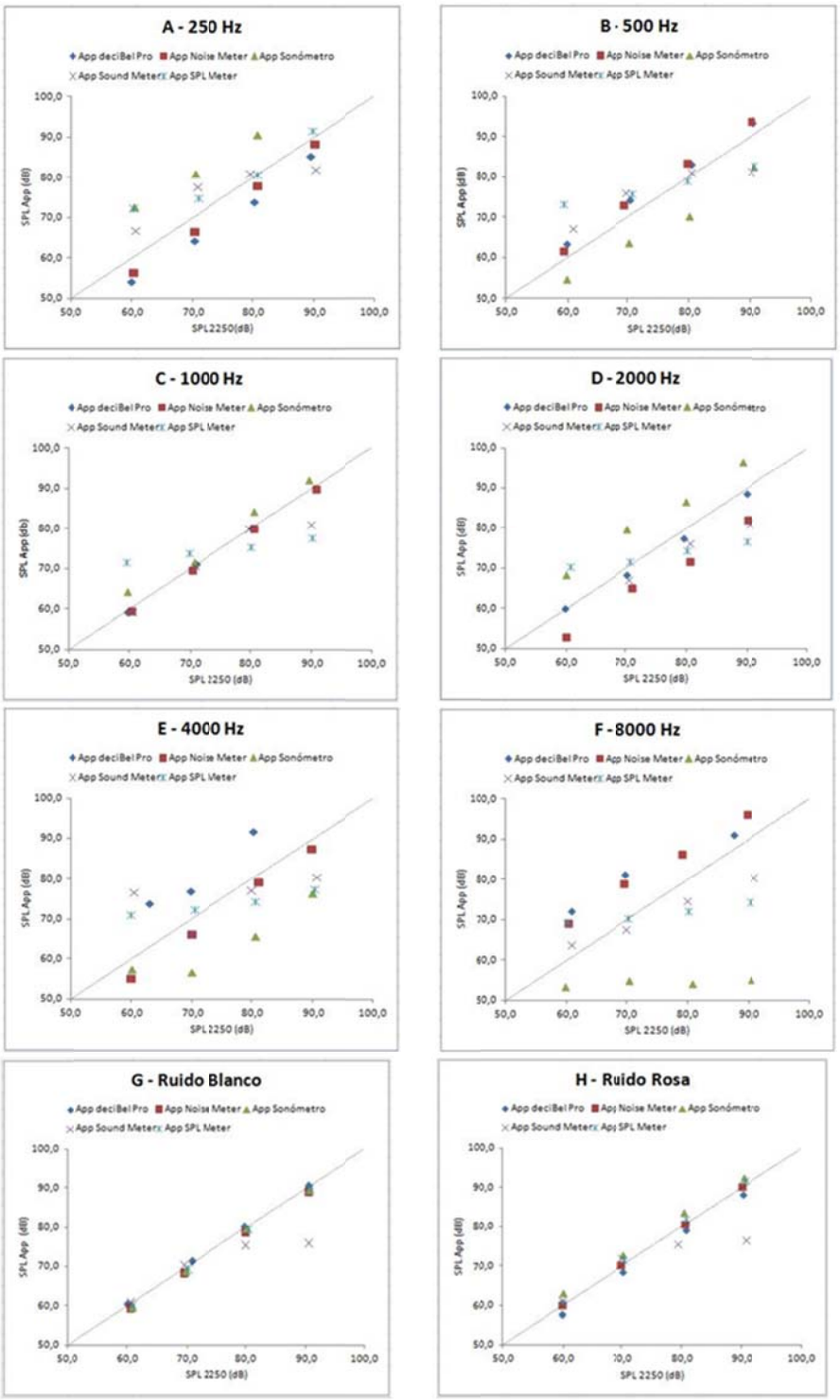
**Medición del Tiempo de Reverberación en Aulas**

Hemos medido el tiempo de reverberación en un aula normal de la Escuela Politécnica (UEx) mediante el sistema Symphonie a la vez que con cada una de las aplicaciones mencionadas en la Tabla 1. Por cada aplicación se han realizado quince mediciones del Tiempo de Reverberación (T60).

## RESULTADOS

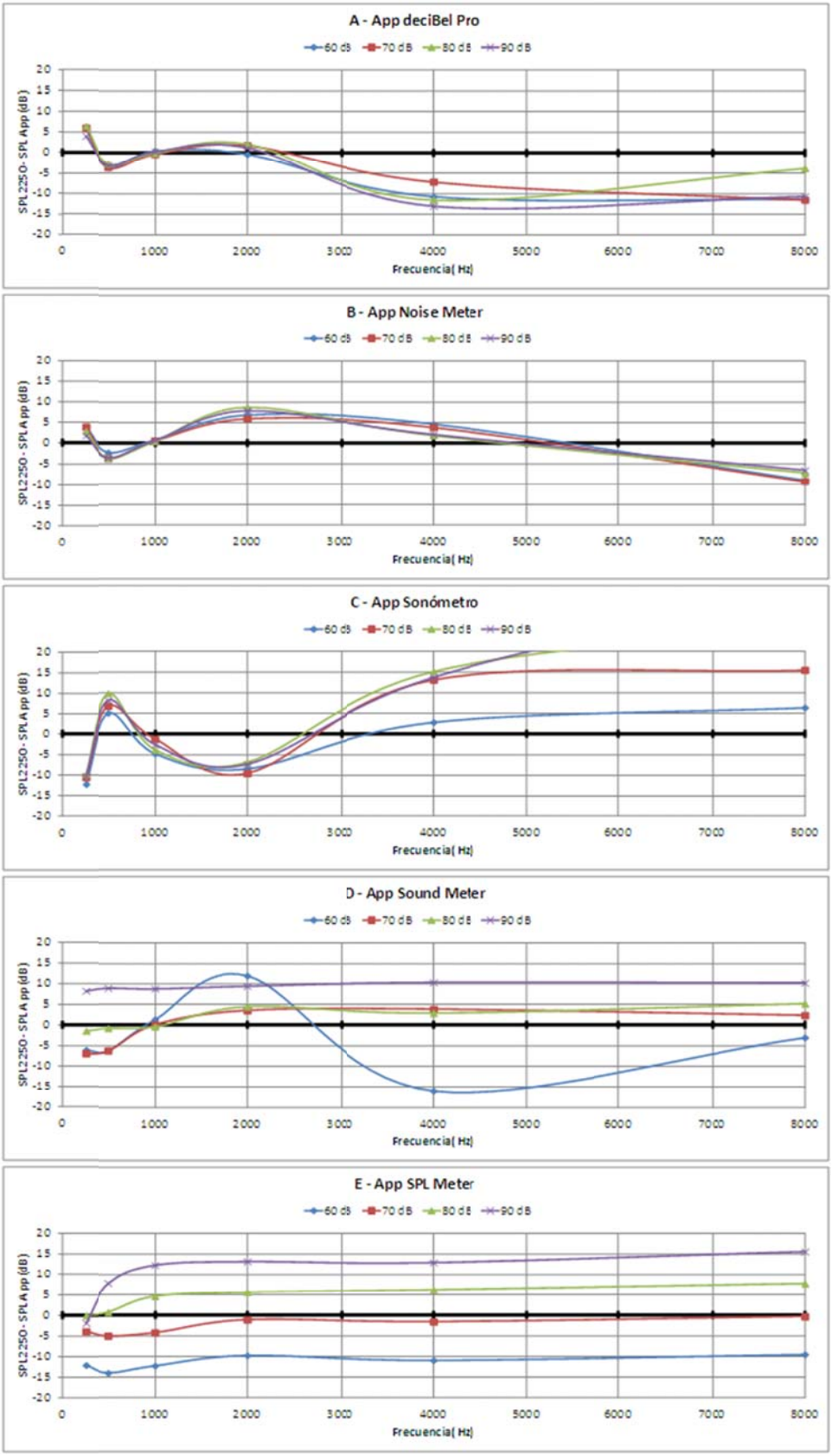
### Medidas en Función de la Frecuencia y del Nivel

Los gráficos 1-A al 1-H muestran la media aritmética de 10 medidas por cada punto.




***Gráficos 1:*** *Medias aritméticas del nivel de presión sonora, habiendo calibrado cada aplicación a 1KHz y 75 dB*

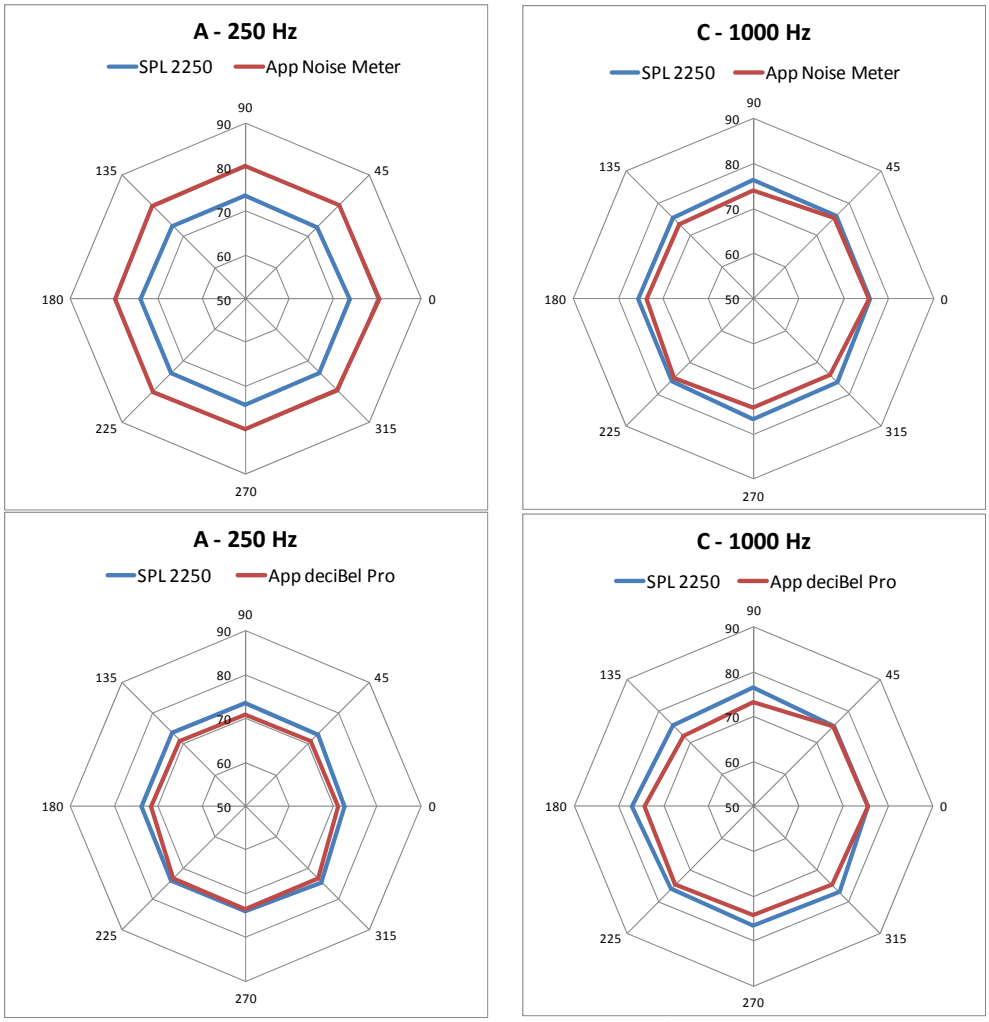
Cada punto de los gráficos anteriores representa sobre el eje horizontal el nivel de presión sonora medido por el sonómetro, y sobre el vertical el que mide la aplicación señalada.




***Gráficos 2:*** Media aritmética de diez diferencias entre niveles medidos por sonómetro y aplicación para cada frecuencia y nivel. (Las líneas continuas se han puesto entre puntos experimentales únicamente como ayuda visual)

**Medidas de la Directividad**

Los Gráficos 3 muestran las directividades obtenidas a dos frecuencias: 250 y 1000 Hz, para un nivel de emisión de 75 dB de la fuente.




***Gráficos 3:*** Directividades medidas para frecuencias de 250 y 1000 Hz, 75 dB de emisión y dos aplicaciones distintas (Noise Meter, y decibel Pro) confrontadas con el sonómetro 2250.

El calibrado de cada aplicación se realizó justo a 1KHz, 75 dB y 0º de posición, en donde veremos que coinciden sonómetro y aplicación (gráficos 1C).

Podemos observar además como para las aplicaciones mencionadas en los gráficos anteriores, la directividad tiene un comportamiento aproximadamente circular con pequeñas diferencias entre el valor medido por sonómetro y aplicación.

No obstante en el gráfico 3A, para la aplicación Noise Meter, a 250 Hz, aunque la circularidad se mantiene, las diferencias han resultado algo mayores.

Para la aplicación SPL Meter en la que obtuvimos también los gráficos de directividad hemos detectado medidas anómalas que se alejan bastante de los valores dados por el sonómetro de referencia, por lo que pensamos que esta aplicación debe ser estudiada de nuevo con más detalle.

**Medida de los Tiempos de Reverberación**

En la Tabla 2 podemos ver los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación según el sistema Symphonie y tres aplicaciones para Smartphone: Acoustic RT, Tiempo de reverberación y Nachhallzeit. Estas aplicaciones son incapaces de medir tiempos largos de reverberación, por lo que tuvimos que cambiar de medir en la cámara reverberante a un aula con bajo TR.

| Aplicación usada | Acoustic RT | | Tiempo de reverberación | | Nachhallzeit | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sistema de medida | Symphonie | Applet | Symphonie | Applet | Symphonie | Applet |
| TR(s) Medio | 1,37 | 0,49 | 1,22 | 1,23 | 1,29 | 1,27 |
| Desviación típica (s) | 0,13 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,08 |

***Tabla 2:*** *Valores medios obtenidos, junto con su desviación típica, para los tiempos de reverberación medidos según el sistema Symphonie y tres aplicaciones para smartphone distintas.*

**ANÁLISIS**

El método que emplean Kardous and Shaw [1] es un método muy potente y automatizado: Básicamente en una cámara de aislamiento, un dispositivo automático lanza un tono aleatorio en frecuencia y nivel de presión sonora, que es medido simultáneamente por el sistema con la aplicación y el sonómetro de referencia. La diferencia entre ambas queda almacenada automáticamente. Con el tiempo van construyendo una serie aleatoria de valores de diferencias bastante amplia (hasta 168 valores para cada aplicación), lo que luego le permite establecer una estadística bastante potente para evaluar aplicaciones y dispositivos.

La estrategia que emplean Nast**,** Speer**,** y Le Prell [2], que es la que hemos empleado nosotros en los Gráficos 1 y 2, es una estrategia más visual, aunque quizás más difícil en cuanto a la hora de evaluar estadísticamente.

En los Gráficos 1 podemos observar el buen comportamiento en general de todas las aplicaciones (exceptuando Sound Meter) en las mediciones de Ruido Blanco y Rosa. Sin embargo en el resto de gráficos a diferentes frecuencias el comportamiento es muy disperso y variado, aunque algunas aplicaciones ya apuntan a menores desviaciones (decibel Pro y Noise Meter).

A partir de los Gráficos 2 es más sencillo obtener valores numéricos absolutos sobre las diferencias entre sonómetro y aplicación. Podemos verlo en la Tabla 2:

| Aplicación/NPS sonora (dB) | 60 (dB) | 70 (dB) | 80 (dB) | 90 (dB) | TOTAL (dB) |
|---|---|---|---|---|---|
| Noise Meter | 27,6 | 27,2 | 24,9 | 22,8 | 102,5 |
| deciBel Pro | 32,3 | 30,3 | 26,7 | 32,2 | 121,4 |
| Sound Meter | 44,5 | 23,0 | 15,0 | 55,7 | 138,2 |
| SPL Meter | 68,5 | 16,1 | 25,0 | 63,6 | 173,1 |
| Sonómetro | 39,8 | 56,6 | 71,9 | 77,2 | 245,4 |

***Tabla 3:*** *Suma aritmética total de las diferencias absolutas (dB) obtenidas para todas las frecuencias a cada nivel de emisión del tono de referencia*

A partir de los Gráficos 3, podemos realizar un cálculo parecido al anterior obteniendo el siguiente ránking: deciBel Pro (199,2 dB), Noise Meter (243,0 dB), y SPL Meter (740,8 dB), indicando el término entre paréntesis la suma total para todos los ángulos y frecuencias (incluidos ruidos blanco y rosa) de todas las diferencias en valor absoluto entre el sonómetro de referencia y la aplicación empleada.

## CONCLUSIONES

El trabajo anterior muestra una serie de resultados experimentales para validar aplicaciones de móviles (en función del nivel de presión sonora, de la frecuencia, de la directividad, e incluso para algunas aplicaciones que miden tiempo de reverberación).

A lo largo del estudio se han mostrado diferentes procedimientos gráficos para ver la funcionalidad de las distintas aplicaciones, y así poder establecer algún tipo de clasificación o ranking.

Entre las aplicaciones que hemos encontrado que responden mejor a estas validaciones tenemos: deciBel Pro y Noise Meter. En cambio entre las que han respondido peor: SPL Meter. Resultados que parecen coincidir con los que muestran los autores ya mencionados en la bibliografía [1-2].

Aunque pensamos que menos fiables, también las valoraciones dadas por el público han coincidido con la tendencia que señalan nuestros resultados experimentales.

Obviamente sería deseable poder ampliar este estudio no sólo a un mayor número de aplicaciones, sino también a diferentes dispositivos tipo *iphones y tablets*, por ejemplo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Chucri A. Kardous and Peter B. Shaw, “Evaluation of smartphone sound measurement applications”; EL186 J. Acoust. Soc. Am. 135 (4), (April 2014)

[2] Daniel R Nast**,** William S Speer**,** Colleen G Le Prell, “Sound level measurements using smartphone "apps": Useful or inaccurate?”; Noise & Health; 16(72), 251-256, (2014).

[3] UNE-*ISO 1996*-1:2005 Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación. UNE-*ISO 1996*-2:2009 Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# USO DE ORDENAMIENTOS CUASI-FRACTALES PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO ACUSTICO DE PANTALLAS BASADAS EN CONJUNTOS DE DISPERSORES RIGIDOS AISLADOS

**PACS:** 43.50.Ki

Castiñeira-Ibáñez, Sergio[1]; Rubio, Constanza[2], Sánchez-Pérez, Juan Vicente[2]

[1]*Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València, Spain, EU, sercasib@mat.upv.es*
[2] *Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València,Spain EU, crubiom@fis.upv.es, jusanc@fis.upv.es*

## ABSTRACT

In recent years, an interesting alternative to classical screens, formed by continuous media, is the use of arrays of isolated scatterers immersed in air, known as Sonic Crystals. Recent works have shown that the redistribution of rigid scatterers in air based on fractal geometries arrangements lead to increased attenuation bands obtained by Bragg diffraction phenomenon. This paper presents a theoretical study, experimentally verified, and devoted to quantify the increase in attenuation bands of a set of isolated rigid cylindrical scatterers arranged following along 2D fractal geometries.

## RESUMEN

En los últimos años, una alternativa interesante a las pantallas clásicas es el uso de redes de dispersores aislados inmersos en aire, conocidos como cristales de sonido. Trabajos recientes han demostrado que la redistribución de los dispersores que forman el cristal de sonido sobre la base de geometrías fractales llevan al aumento de las bandas de atenuación obtenidas mediante el fenómeno de la difracción Bragg. En este trabajo se presenta un estudio teórico, verificado experimentalmente, dedicado a cuantificar el aumento de las bandas de atenuación de un conjunto de dispersores cilíndricos rígidos y aislados dispuestos siguiendo una geometría fractal 2D.

## INTRODUCCION

Una de las soluciones para el control de ruido en la fase de transmisión viene dada por la utilización de barreras acústicas. En los últimos años, la posibilidad de manipular el sonido a través de estructuras periódicas motivó la idea de utilizar estos medios como una alternativa a la barrera acústica clásica [1]. Estas estructuras periódicas son los cristales de sonido [2]. Estos sistemas presentan una propiedad interesante que permiten su uso como barrera acústica: la existencia de bandas de frecuencias en las que el sonido no se transmite a través del cristal,

denominadas bandas de atenuación acústica. El mecanismo físico que subyace en este fenómeno consiste en la existencia de interferencias destructivas debidas a la difracción Bragg, es decir, a un proceso de dispersión múltiple relacionado con la periodicidad del sistema. Sin embargo, este fenómeno no es suficiente para asegurar una alta eficiencia de una barrera acústica basada en cristales de sonido aunque un aumento de la efectividad de la difracción Bragg sería deseable para diseñar una pantalla más eficiente. En los últimos años, se han desarrollado nuevas formas de maximizar el efecto de la difracción Bragg en conjuntos de dispersores aislados utilizando nuevos ordenamientos diferentes a las simetrías cristalinas típicas, basados en el concepto de hiperuniformidad [3]. Así, se ha desarrollado una técnica en dos pasos de maximización del efecto de la difracción Bragg siguiendo ordenamientos fractales [4]. En este trabajo se muestra la caracterización acústica de estructuras basadas en dispersores aislados realizadas siguiendo ordenamientos fractales [5].

## CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LAS PROPIEDADES DE LAS BANDAS DE ATENUACION PARA GRUPOS DE DISPERSORES ACÚSTICOS AISLADOS DISPUESTOS SEGÚN GEOMETRÍAS FRACTALES

En este apartado se presenta un estudio teórico, verificado experimentalmente [5] dedicado a cuantificar el aumento en el tamaño de las bandas de atenuación de un conjunto de dispersores aislados rígidos dispuestos siguiendo una geometría fractal 2D. Dado que los niveles de iteración no pueden ser elevados debido a la imposibilidad física de llegar al infinito las estructuras 2D que se analizan se denominan cuasi-fractales. En este trabajo se analiza el triángulo de Sierpinski, cuya construcción se muestra en la Figura 1.

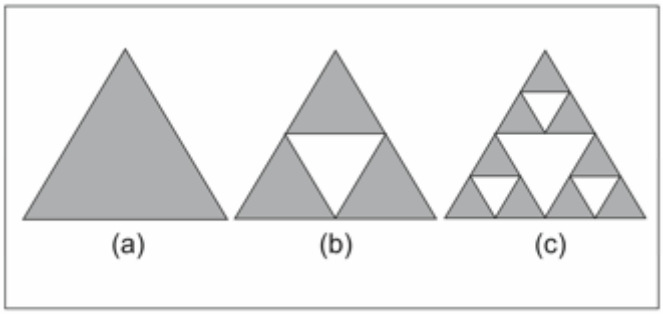



Figura 1: El recuadro muestra la construcción del triángulo de Sierpinski.

El estudio realizado se organiza para cada caso en tres fases: en primer lugar, se miden las variaciones en las propiedades de las bandas de atenuación durante todo el proceso de crecimiento de una estructura cuasi-fractal creada a partir de una estructura inicial, denominada clúster. En este proceso de crecimiento el grupo de partida, clúster inicial, se repite tantas veces como sea necesario siguiendo la geometría fractal seleccionada. En segundo lugar, se sigue un crecimiento cristalino clásico, también a partir del clúster inicial. En este caso, lo habitual es hacer traslaciones y rotaciones del clúster inicial. Ambos procesos de crecimiento tienen que parar en el cuarto nivel para el triángulo de Sierpinski ya que existe una limitación en el tamaño de las estructuras creadas debido a la capacidad computacional y experimental de que se dispone. En tercer lugar, se comparan cuantitativamente las propiedades de las bandas de atenuación de ambos tipos de muestras, cuasi-fractal y cristalina con el mismo nivel de crecimiento. Para ello hay que tener en cuenta que el tamaño de la muestra debe ser el mismo y además con la misma forma externa. Los cálculos teóricos se han llevado a cabo utilizando el Método de los Elementos Finitos (FEM) mediante el programa comercial Comsol Multiphysics 3.5a.

## CALCULOS TEORICOS

Se ha elegido un clúster de inicio formado por tres cilindros de aluminio con un radio de 0,02 m como dispersores. Estos cilindros están dispuestos de acuerdo con un patrón triangular con parámetro de red de 0,0635 m. Para cuantificar las propiedades de atenuación de las muestras consideradas se ha utilizado el parámetro área de atenuación (AA) [6] en el rango analizado de frecuencias (0-6500 Hz) y a lo largo del eje OX (ΓX -dirección del SC). Se utiliza también el parámetro factor de llenado (ff), que representa el volumen ocupado por el medio dispersor respecto al volumen total de la muestra. Para analizar la capacidad de atenuación de las muestras, en la Figura 2 se ha representado AA como una función del ff para las distintas muestras analizadas. Como todas ellas tienen su forma exterior triangular, debido a la geometría fractal elegida y en cada nivel de crecimiento, el área ocupada por estas es la misma, es posible comparar los tamaños de las bandas de atenuación para cada pareja del mismo nivel. Se utiliza como notación para diferenciar las muestras entre si dos letras y un número. Las dos letras hacer referencia al tipo de muestra y el número, al nivel de iteración del crecimiento correspondiente. En la Tabla 1 se indica el significado de los códigos utilizados. Por lo tanto, las parejas de MC1-MF1, MC2-MF2, MC3-MF3, MC4-MF4 tienen un área ocupada igual, que es mayor cuando el nivel de crecimiento (1, 2, 3 y 4 ascendente) es mayor. El valor numérico de estas áreas ocupadas se muestra en la Figura 2 debajo de la vista de la sección transversal de cada muestra cristalina considerada.

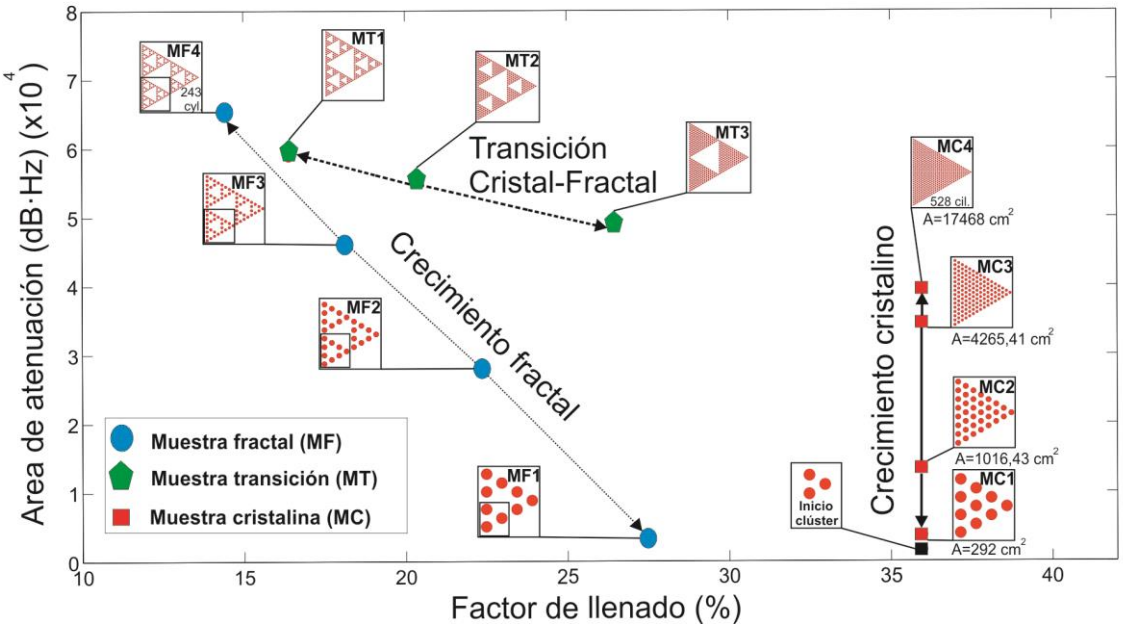



Figura 2: Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff %) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristalino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectados por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristalina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristalina que tenga la misma numeración.

| Código de la muestra | Significado |
|---|---|
| MC | Muestra crecimiento cristalino |
| MF | Muestra crecimiento cuasi-fractal |
| MT | Muestra transición cristalina-fractal |

Tabla 1: Nomenclatura utilizada para las diferentes muestras analizadas.

En la Figura 2 se muestran ambos casos de crecimiento, cristalino y cuasi-fractal. A la derecha, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cristalinas a partir del clúster (cuadrados conectados por una línea continua negra). En este caso, el ff se mantiene constante durante todo el proceso de crecimiento (36%), mientras que las AA aumentan al mismo tiempo que el área de las muestras, siendo este el comportamiento típico de un crecimiento cristalino. Así, la muestra cristalina más grande (MC4) que está formada por 528 cilindros, ocupa un área A = 17468 cm², posee un valor de AA igual a 39580 Hz·dB. Por otro lado y a la izquierda de la gráfica, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cuasi-fractales (círculos conectados por una línea de puntos negro). En el caso cuasi-fractal, la tendencia observada en el proceso de crecimiento indica una disminución del ff, de 28% al 14%, mientras que el AA se incrementa significativamente en este proceso de 3158 Hz·dB (MF1) a 64954 Hz·dB (MF4). Por lo tanto la capacidad de atenuación de la muestra MF4 supera claramente el valor obtenido por la muestra cristalina equivalente (MC4) siendo un 164% mayor. Por otra parte, la muestra MF4 está formada por 243 cilindros, que representa una disminución de dispersores respecto a la muestra MC4 de un 46%. Los resultados numéricos para ambos casos se muestran en la Tabla2.

| Estructura | Número de dispersores | AA (dB·Hz) | ff% |
|---|---|---|---|
| MC4 | 528 | 39580 | 36 |
| MF4 | 243 | 64954 | 14 |

Tabla 2: Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC4) y crecimiento fractal (MF4), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (17468 cm²).

Los resultados obtenidos muestran que en sólo cuatro niveles de crecimiento, las propiedades de atenuación de las muestras cuasi-fractales han mejorado significativamente utilizando menos dispersores que en el caso cristalino. Además, en el gráfico de la Figura 2 se puede observar la transición en el proceso de crecimiento cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea de trazos negro). En esta transición, que puede ser entendida como la creación del cuasi-fractal MF4 a partir de una muestra cristalina completa (MC4), donde las muestras MT3, MT2, MT1 y MF4 son los cuatro niveles de los cuasi-fractales creados, se puede observar la disminución del ff mientras aumenta el AA, manteniendo constante el área externa a lo largo de la transición.

## VALIDACION DE LOS RESULTADOS NUMERICOS REALIZADOS

Los experimentos, realizados para determinar la validez de los resultados analíticos, se han llevado a cabo en la cámara anecoica (8 x 6 x 3 m³) perteneciente al Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València. Los resultados de su calibración y sus principales características se pueden consultar en la referencia [7]. A continuación se muestran los resultados experimentales del triángulo de Sierpinski. Finalmente, se validan los resultados teóricos mediante la comparación con los resultados experimentales.

En el recuadro de la Figura 3(a) puede verse una vista de la sección transversal del clúster utilizado. Al lado de esta forma, en la Figura 3(a) se muestra la estructura cuasi-fractal formada a partir de la agrupación de partida (clúster) y la muestra experimental construida para validar la resultados teóricos, hasta el cuarto nivel fractal. Se ha obtenido la presión en un punto situado a 1 m detrás de la muestra de acuerdo con el esquema que se muestra en el recuadro de la Figura 3(b) En esta figura, además, se muestra la comparativa entre el espectro experimental y el teórico, donde puede verse la buena concordancia entre los resultados, que permite validar el modelo teórico utilizado y los resultados obtenidos.

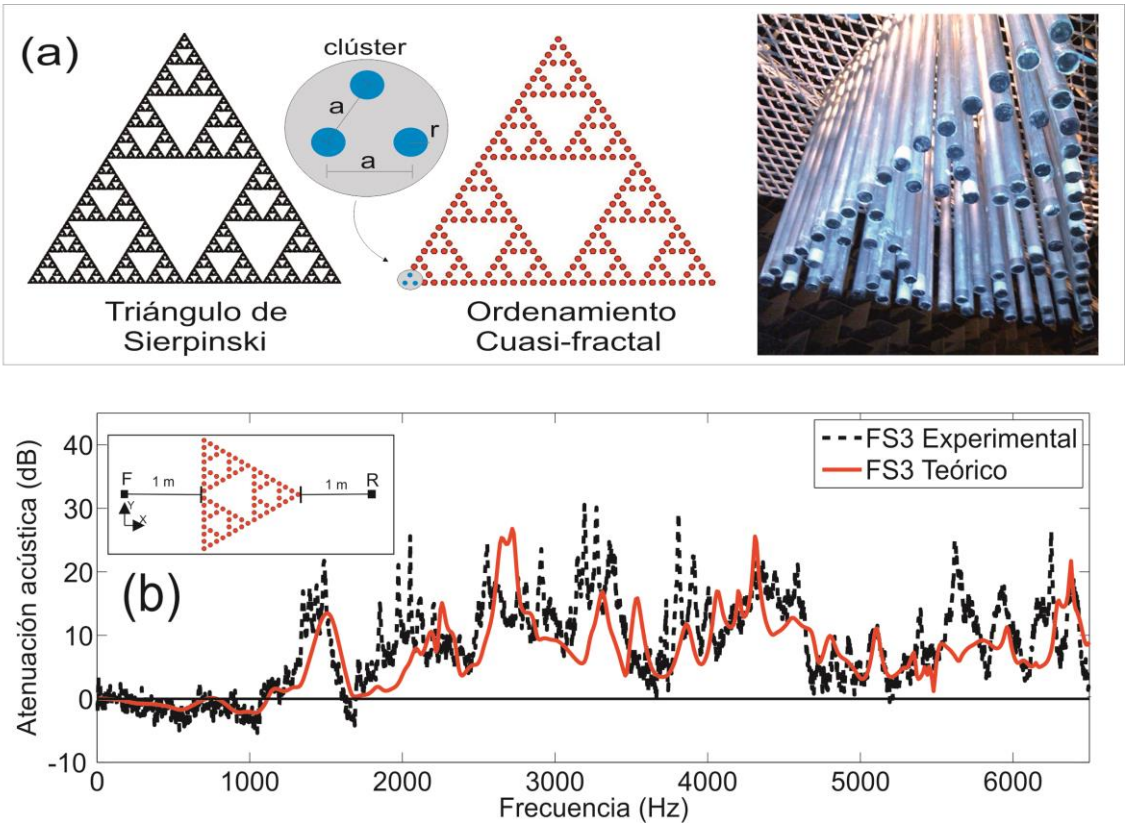



Figura 3: (a) La geometría fractal triángulo de Sierpinski hasta el quinto nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal más grande de cilindros considerado (cuarto nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. En el recuadro se puede ver el clúster de comienzo considerado; (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua) para una orientación 0º en la geometría cristalina.

## CONCLUSIONES

Se ha demostrado cuantitativamente que ordenando los dispersores siguiendo geometrías fractales se obtienen bandas de atenuación mayores que si se ordenan siguiendo crecimientos cristalinos. Para ello, se han comparado los resultados de atenuación, usando el parámetro AA obtenido para un conjunto de cilindros inmersos en aire dispuestos según geometrías fractales o cristalinas (triangular).

Estos resultados confirman que:

- en el caso de un conjunto de dispersores dispuestos siguiendo un patrón fractal, se produce un rápido aumento en las propiedades de atenuación en comparación con el caso cristalino;
- si un dispositivo formado por un conjunto de dispersores tiene que ocupar un área predeterminada, una disposición cuasi-fractal proporciona mucha más atenuación utilizando menos dispersores que si los dispersores están dispuestos siguiendo un patrón cristalino.

Estos resultados pueden ser tecnológicamente relevantes para diseñar dispositivos de control de ondas más competitivos, que utilizarían ordenamientos cuasi-fractales, con respecto a otros dispositivos basados en diferentes principios físicos. Estos dispositivos son ya una realidad. Actualmente existen pantallas acústicas basadas en cristales de sonido con ordenamientos cuasi-fractales que han sido homologadas [8] y que pueden competir en el mercado con las pantallas tradicionales.

**REFERENCIAS**

[1] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81**(27), 5240-5242 (2002)
[2] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Pérez J. V., Llinares J., Meseguer F., Nature (London) **387**, 241 (1995)
[3] Florescu M., Torquato S. and Steindhardt P., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **106**, 20658 (2009)
[4] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., and Garcia-Raffi L. M., E.Phys.Lett. **92**, 24007 (2010)
[5] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Redondo J. and Sánchez-Pérez J.V., Appl. Phys. Express **7**, 042201 (2014)
[6] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81**(27), 5240-5242 (2002)
[7] Rubio C., Sánchez-Pérez J. V., Martínez-Sala R. and Cervera F., Medida de las características de campo libre de una cámara anecoica. Tecniacústica, 96-98 (1997)
[8] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L.M., Archives of Acoustics **37**(4), 455-462 (2012)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

# MODELADO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE CATALIZADORES CÓNICOS MEDIANTE COLOCACIÓN PUNTUAL

Referencia PACS: 43.50.Gf, 43.20.Mv, 43.20.Bi

Denia, F.D.; Sánchez-Orgaz, E.M.; Carballeira, J.; Fuenmayor, F.J.
Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España
Tel: +34 963877007 Ext: 76225
Fax: +34 963877659
Email: fdenia@mcm.upv.es; evsncor@upvnet.upv.es; jacarmo@mcm.upv.es; ffuenmay@mcm.upv.es

## ABSTRACT

In this work, a three-dimensional semianalytical model is presented for the sound attenuation assessment of automotive catalytic converters. Higher order mode propagation in the cylindrical inlet/outlet and tapered ducts is combined with one-dimensional wave propagation within the capillary ducts of the central monolith. The point collocation technique and the continuity conditions of the acoustic fields at the interfaces are considered to couple the solutions of the wave equation in the corresponding catalyst subdomains (Bessel functions are considered for the circular inlet/outlet, while spherical Hankel and Legendre functions are used for the expansion/contraction tapered ducts). Benchmarking of the developed semianalytical technique against finite element calculations is carried out, showing a good agreement and a lower computation expenditure. The influence of several design parameters on the sound attenuation of the catalyst is investigated.

## RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo semianalítico tridimensional para el estudio de la atenuación acústica en catalizadores de automoción. Se combina la propagación de modos de alto orden en los conductos de entrada y salida, de geometría cilíndrica y troncocónica, respectivamente, con un modelo unidimensional para los conductos capilares del monolito central. Para llevar a cabo el acoplamiento de las soluciones de la ecuación de ondas en los distintos dominios (funciones de Bessel en zonas cilíndricas, así como funciones de Hankel esféricas y de Legendre en las troncocónicas), se consideran las condiciones de continuidad del campo acústico en las interfases y la técnica de colocación puntual. Los resultados proporcionados por dicha técnica se validan mediante la comparación con simulaciones numéricas basadas en elementos finitos, mostrando una buena concordancia y un coste computacional menor. Además, se analiza la atenuación acústica del catalizador en función de algunos parámetros relevantes de diseño.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, y debido a las limitaciones existentes en lo referente a emisiones contaminantes, la utilización de dispositivos de postratamiento tales como catalizadores se ha convertido en una práctica necesaria en el diseño del sistema de escape de MCIA. Si bien el diseño de tales dispositivos se centra fundamentalmente en el control de emisiones nocivas, los aspectos acústicos asociados al catalizador juegan también un papel relevante y han de ser tenidos en cuenta en el diseño integral del sistema de escape del vehículo. De esta manera, y desde un punto de vista global, en el desarrollo de herramientas de predicción del comportamiento acústico de la línea de escape completa ha de considerarse no sólo la atenuación de ruido debida a los silenciadores, sino también la influencia del convertidor catalítico. Por este motivo, en las publicaciones científicas sobre control de emisiones sonoras en motores pueden encontrarse diversas referencias asociadas al modelado acústico del catalizador [1-6].

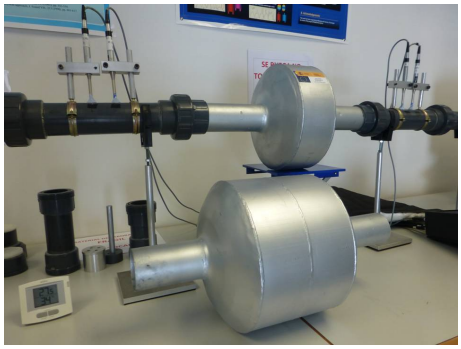
En primer lugar deben valorarse los fenómenos de propagación sonora en el interior del monolito, que está formado por miles de conductos capilares cuya sección transversal es de dimensiones muy reducidas (del orden de un milímetro cuadrado cada capilar). Especial relevancia tienen los fenómenos de interacción viscotérmica entre el aire y el conducto capilar. Una referencia obligada corresponde al trabajo de Kirchhoff [7], que presentó un modelo detallado para medio de propagación en reposo (sin flujo medio). Posteriormente, Zwikker y Kosten [8] obtuvieron soluciones relevantes para dicho modelo en el caso de capilares con sección transversal circular. De mayor interés práctico son las secciones rectangulares, tenidas en cuenta en los trabajos de Stinson [9] y Roh et al. [10]. La presencia de flujo medio fue tenida en cuenta por Dokumaci [11], que extendió el trabajo de Zwikker y Kosten [8] y obtuvo una solución analítica sencilla para considerar medio de propagación en movimiento en capilares circulares. Más tarde, el mismo autor presentó una solución analítica para conductos rectangulares de pequeñas dimensiones transversales, de nuevo en presencia de flujo medio [12].

Por otro lado, tanto el desarrollo como la implementación de herramientas de predicción del comportamiento acústico del catalizador completo requieren adicionalmente modelos acústicos para los conductos de conexión de entrada y salida ubicados a ambos lados del monolito. Los modelos tradicionales de onda plana [11,12] presentan importantes limitaciones y sólo son aplicables en el rango de bajas frecuencias y para conductos de pequeñas dimensiones. Por estos motivos, y con vistas a tener mayor precisión en el análisis, en los últimos años se han desarrollado numerosos esquemas multidimensionales numéricos [5,6,13] y analíticos [2-4], estos últimos de menor coste computacional. Los esquemas multidimensionales pueden subdividirse en dos grandes grupos: (1) Por un lado, los denominados 3D/3D, de menor realismo y precisión, en los se considera propagación multidimensional tanto con los conductos de entrada y salida como en los capilares. Para ello se asume que el monolito se asemeja, acústicamente hablando, a un medio de propagación con comportamiento homogéneo e isótropo, definido por una densidad y una velocidad del sonido efectivas complejas y dependientes de la frecuencia [14]; (2) Por otro lado, la técnica 3D/1D, más realista [2-4], que consiste en la sustitución del convertidor catalítico por una matriz de transferencia que asume comportamiento acústico unidimensional (1D) en su interior, e ignora cualquier posible interacción acústica entre capilares adyacentes. De esta forma, la solución del campo acústico puede ser tridimensional (3D) en los conductos de entrada y salida, pero sólo se permite la presencia de ondas planas en el monolito, lo cual es más consistente con las características fundamentalmente unidimensionales de los conductos capilares que integran el catalizador.

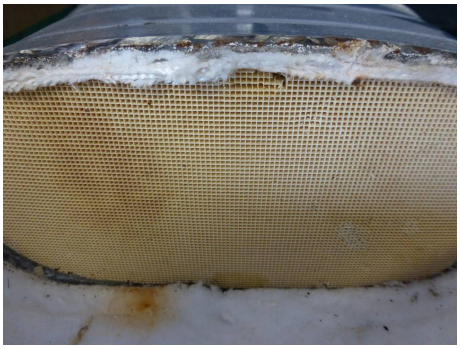
En este trabajo, la aproximación 3D/1D se combina con la técnica de colocación puntual [15-21] para reducir el coste computacional de otras herramientas basadas en el método de elementos finitos [6,13] y la técnica analítica de ajuste modal por integración ponderada, desarrollada por el grupo investigador en trabajos anteriores [2]. Se combina la propagación de modos de alto orden (3D) en los conductos de entrada y salida, de geometría cilíndrica y troncocónica, respectivamente, con un modelo unidimensional (1D) para los conductos capilares del monolito central. El acoplamiento de las soluciones de la ecuación de ondas en los distintos dominios (funciones de Bessel en zonas cilíndricas, así como funciones de Hankel esféricas y de Legendre en las troncocónicas) se efectúa en base a las condiciones de continuidad del campo de presiones y velocidades acústicas axiales en las interfaces de entrada y salida. Dichas condiciones de continuidad no se imponen de forma integral, como en la técnica de ajuste modal [2,22], sino que se fuerzan a nivel puntual en una nube de puntos de colocación, con la consiguiente reducción de coste computacional al eliminar la necesidad de integración. Además, se evitan los problemas de mal condicionamiento del sistema de ecuaciones asociado a integración ponderada (debidos, en principio, a la inexistencia de ortogonalidad de las funciones de ponderación respecto a los modos transversales de presión). Los resultados obtenidos mediante la técnica de colocación puntual se validan por comparación con simulaciones numéricas basadas en elementos finitos, mostrando una buena concordancia y un coste computacional menor. Finalmente se analiza la atenuación acústica del catalizador en función de la porosidad del monolito y su resistividad.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ACÚSTICO Y ENFOQUE MATEMÁTICO

En la Fig. 1 se muestran fotografías de un prototipo de catalizador, un monolito cerámico, otro metálico y el esquema correspondiente al modelo analítico 3D/1D [2-4], en el que la propagación es tridimensional en las regiones de entrada/salida (*A*, *B*, *D* y *E*) y unidimensional en el dispositivo de postratamiento (monolito), cuya región asociada (*C*) ha sido sustituida por una matriz de transferencia de onda de plana $\mathbf{T}^m$ [2-5]. Como se verá posteriormente con mayor detalle, dicha matriz establece un acoplamiento entrada/salida que relaciona la presión y la velocidad acústica axial en la sección de transición B/C (entrada al monolito) con los mismos campos acústicos en la sección de transición C/D (salida del monolito). Los conductos de entrada y salida quedan caracterizados, desde un punto de vista acústico, por la densidad del aire $\rho_0$ y la velocidad del sonido $c_0$. El monolito se representa mediante las propiedades acústicas efectivas $\rho_m$ y $c_m$.



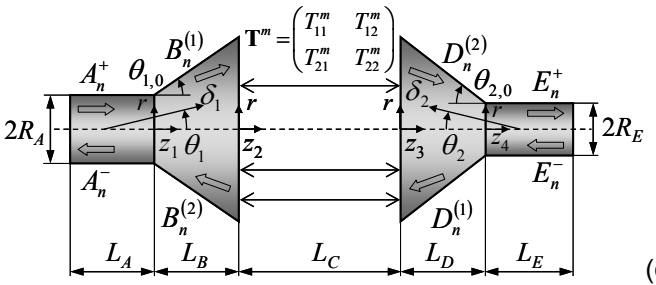
(a)



(b)



(c)




(d)

Figura 1 – (a) Prototipos de catalizador; (b) monolito cerámico de capilar cuadrado; (c) monolito metálico de capilar triangular; (d) esquema de catalizador, modelo 3D/1D (monolito reemplazado por una matriz de transferencia).

### 2.1. Ecuaciones acústicas

La propagación del sonido satisface la ecuación de Helmholtz [14,15]

$$\nabla^2 P + \kappa^2 P = 0 \tag{1}$$

donde $\nabla^2$ es el operador laplaciano, $P$ es la presión acústica y $\kappa$ el número de onda de la región bajo estudio. Se tiene que

$$\kappa = \begin{cases} k_0 = \omega / c_0 , & \text{aire, conductos } A, B, D, E \\ k_m = \omega / c_m , & \text{monolito, conducto } C \end{cases} \tag{2}$$

siendo $k_0$ y $k_m$ los números de onda del aire y el monolito, respectivamente, y $\omega$ la frecuencia angular.

Para medio de propagación en reposo, es decir, en ausencia de flujo medio, los fenómenos acústicos en el seno de los conductos capilares del monolito pueden ser descritos considerando las propiedades equivalentes definidas anteriormente, $\rho_m$ y $c_m$, dadas por [1,14]

$$\rho_m = \rho_0 \left(1 + R\phi G_c(s) / (\mathrm{j}\omega\rho_0)\right), \quad c_m = c_0 \left(\left(1 + R\phi G_c(s) / (\mathrm{j}\omega\rho_0)\right)\left(\gamma - (\gamma - 1)F\right)\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{3,4}$$

donde $R$ es la resistividad al flujo, $\phi$ es la porosidad del monolito, $G_c(s)$ es una función del número de onda tangencial $s$, $\gamma$ es el cociente de calores específicos y $F$ tiene como definición

$$F = \left(1 + R\phi G_c\left(\sqrt{\mathrm{Pr}}\, s\right) \Big/ \left(\mathrm{j}\,\mathrm{Pr}\,\omega\rho_0\right)\right)^{-1} \tag{5}$$

siendo Pr el número de Prandtl.

Para conductos circulares como el de entrada *A* (y el de salida *E*), la solución axisimétrica de la Ec. (1) puede escribirse como

$$P_A(r,z_1)=\sum_{n=0}^{\infty}\left(A_n^+ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_{A,n}z_1}+A_n^- \mathrm{e}^{\mathrm{j}k_{A,n}z_1}\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_A}r\right) \tag{6}$$

donde j = $\sqrt{-1}$ es la unidad imaginaria, $A_n^+$ y $A_n^-$ son las amplitudes modales (incógnitas) progresivas y regresivas, *n* es el número modal, (*r*, $z_1$) son coordenadas cilíndricas, $\mathrm{J}_0$ es la función de Bessel de primera especie y orden cero, $\alpha_n$ es la enésima raíz (o valor característico) asociado a la condición de conducto de pared rígida $\mathrm{J}_0'(\alpha_n)$ = 0 y $k_{A,n}$ es el número de onda axial del modo *n*, dado por

$$k_{A,n}=\pm\sqrt{k_0^2-\left(\alpha_n/R_A\right)^2} \tag{7}$$

Conocida la presión, la ecuación de Euler permite obtener la velocidad axial, por ejemplo en el conducto *A*, como

$$U_A(r,z_1)=\frac{1}{\omega\rho_0}\sum_{n=0}^{\infty}k_{A,n}\left(A_n^+ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_{A,n}z_1}-A_n^- \mathrm{e}^{\mathrm{j}k_{A,n}z_1}\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_A}r\right) \tag{8}$$

Para el conducto cónico *B* (y también el *D*), la solución axisimétrica de la Ec. (1) puede expresarse como [2,23,24]

$$P_B(\delta_1,\theta_1)=\sum_{n=0}^{\infty}\left(B_n^{(1)}\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(1)}(k_0\delta_1)+B_n^{(2)}\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(2)}(k_0\delta_1)\right)\mathrm{g}_{\nu_{B,n}}(\cos\theta_1) \tag{9}$$

$B_n^{(1)}$ y $B_n^{(2)}$ son las amplitudes modales (incógnitas) de las ondas divergentes y convergentes, ($\delta_1$, $\theta_1$) son coordenadas esféricas, $\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(1)}$ y $\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(2)}$ son las funciones de Hankel esféricas de primera y segunda especie, $g_{\nu_{B,n}}$ es la función de Legendre y $\nu_{B,n}$ es el enésimo valor, dependiente del semiángulo de apertura, asociado a la condición de conducto troncocónico de pared rígida [23]

$$\left.\frac{\partial\, g_{\nu_B}(\cos\theta_1)}{\partial\cos\theta_1}\right|_{\theta_1=\theta_{1,0}}=0 \tag{10}$$

La Tabla 1 muestra algunos valores para diferentes ángulos.

Tabla 1 - Valores $\nu_{B,n}$ de un conducto cónico en función del semiángulo de apertura.

| $\theta_{1,0}$ (grados) | *n* = 0 | *n* = 1 | *n* = 2 |
|---|---|---|---|
| 20 | 0 | 10.49 | 19.60 |
| 40 | 0 | 5.01 | 9.56 |
| 60 | 0 | 3.20 | 6.22 |

La aplicación posterior de la técnica de colocación puntual requiere la obtención previa de la velocidad acústica en la expansión troncocónica. En concreto se utiliza la componente axial, paralela al eje *z*, dada por [2,24]

$$U = U_\delta \cos\theta - U_\theta \operatorname{sen}\theta;\quad U_\delta = -\frac{1}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\frac{\partial P}{\partial \delta};\quad U_\theta = -\frac{1}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\frac{1}{\delta}\frac{\partial P}{\partial \theta} \tag{11-13}$$

Combinando las Ecs. (9) y (11)-(13), la velocidad axial en el conducto cónico *B* se puede expresar como

$$\begin{aligned} U_B(\delta_1,\theta_1) &= -\frac{1}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\left(\frac{\partial P_B(\delta_1,\theta_1)}{\partial \delta_1}\cos\theta_1 - \frac{1}{\delta_1}\frac{\partial P_B(\delta_1,\theta_1)}{\partial \theta_1}\operatorname{sen}\theta_1\right) \\ &= -\frac{1}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\left(B_n^{(1)}\frac{\partial \mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(1)}(k_0\delta_1)}{\partial \delta_1} + B_n^{(2)}\frac{\partial \mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(2)}(k_0\delta_1)}{\partial \delta_1}\right)\mathrm{g}_{\nu_{B,n}}(\cos\theta_1)\cos\theta_1\right. \\ &\quad \left. -\frac{1}{\delta_1}\frac{\partial \mathrm{g}_{\nu_{B,n}}(\cos\theta_1)}{\partial \theta_1}\left(B_n^{(1)}\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(1)}(k_0\delta_1) + B_n^{(2)}\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(2)}(k_0\delta_1)\right)\operatorname{sen}\theta_1\right) \end{aligned} \tag{14}$$

Las condiciones de continuidad del campo acústico en las interfases entre conductos pueden escribirse como

$$P_A(r,z_1)\big|_{z_1=0} = P_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_1=0},\quad U_A(r,z_1)\big|_{z_1=0} = U_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_1=0}\quad \text{para } 0\le r\le R_A \tag{15,16}$$

$$P_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = P_C(r,z_2)\big|_{z_2=0},\quad U_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = \phi U_C(r,z_2)\big|_{z_2=0}\quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{17,18}$$

$$P_C(r,z_2)\big|_{z_2=L_C} = P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0},\quad \phi U_C(r,z_2)\big|_{z_2=L_C} = U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0}\quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{19,20}$$

$$P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_4=0} = P_E(r,z_4)\big|_{z_4=0},\quad U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_4=0} = U_E(r,z_4)\big|_{z_4=0}\quad \text{para } 0\le r\le R_E \tag{21,22}$$

Se introduce la siguiente nomenclatura para los modos acústicos de los conductos cónicos, con objeto de compactar las ecuaciones asociadas al procedimiento de colocación puntual

$$\Theta_{X,n}^{(j)}(\delta_i,\theta_i) = \mathrm{h}_{\nu_{X,n}}^{(j)}(k_0\delta_i)\,\mathrm{g}_{\nu_{X,n}}(\cos\theta_i) \tag{23}$$

$$\Xi_{X,n}^{(j)}(\delta_i,\theta_i) = \frac{\partial \mathrm{h}_{\nu_{X,n}}^{(j)}(k_0\delta_i)}{\partial \delta_i}\mathrm{g}_{\nu_{X,n}}(\cos\theta_i)\cos\theta_i - \frac{1}{\delta_i}\frac{\partial \mathrm{g}_{\nu_{X,n}}(\cos\theta_i)}{\partial \theta_i}\mathrm{h}_{\nu_{X,n}}^{(j)}(k_0\delta_i)\operatorname{sen}\theta_i \tag{24}$$

donde $X = B$, $i = 1$ hace referencia al cono divergente y $X = D$, $i = 2$ se refiere al convergente. Además, $j = 1, 2$ se asocia con la funciones de Hankel esféricas $\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(1)}$ y $\mathrm{h}_{\nu_{B,n}}^{(2)}$, respectivamente.

Como se muestra en la Fig. (1), el monolito cerámico se reemplaza por una matriz de transferencia que representa propagación de onda plana en el interior de los conductos capilares. Dicha matriz establece una relación entre los campos acústicos de presión y velocidad a ambos lados del monolito dentro de la región *C*, y viene dada por [1-6,14]

$$\begin{Bmatrix} P_C(r,z_2)\big|_{z_2=0} \\ U_C(r,z_2)\big|_{z_2=0} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_m L_C) & \mathrm{j}\rho_m c_m \operatorname{sen}(k_m L_C) \\ \mathrm{j}\operatorname{sen}(k_m L_C)/(\rho_m c_m) & \cos(k_m L_C) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} P_C(r,z_2)\big|_{z_2=L_C} \\ U_C(r,z_2)\big|_{z_2=L_C} \end{Bmatrix} \tag{25}$$

Esta última ecuación se combina con las Ecs. (17)-(20), para obtener las relaciones entre los campos acústicos a ambos lados del monolito, en las zonas externas de las interfaces (*B* y *D*). Para ello, nótese que entra en juego la porosidad $\phi$ del monolito y puede escribirse

$$P_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = T_{11}^m\, P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} + T_{12}^m\, U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{26}$$

$$U_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = T_{21}^m\, P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} + T_{22}^m\, U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{27}$$

donde la matriz de transferencia

$$\begin{pmatrix} T_{11}^m & T_{12}^m \\ T_{21}^m & T_{22}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_m L_C) & \mathrm{j}\rho_m c_m \operatorname{sen}(k_m L_C)/\phi \\ \mathrm{j}\phi \operatorname{sen}(k_m L_C)/(\rho_m c_m) & \cos(k_m L_C) \end{pmatrix} \tag{28}$$

difiere de la utilizada en la Ec. (25) únicamente en los términos fuera de la diagonal, que quedan afectados por $\phi$.

El conjunto de Ecs. (15)-(22) queda finalmente como

$$P_A(r,z_1)\big|_{z_1=0} = P_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_1=0},\;\; U_A(r,z_1)\big|_{z_1=0} = U_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_1=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_A \tag{29,30}$$

$$P_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = T_{11}^m\, P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} + T_{12}^m\, U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{31}$$

$$U_B(\delta_1,\theta_1)\big|_{z_2=0} = T_{21}^m\, P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} + T_{22}^m\, U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_3=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_C \tag{32}$$

$$P_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_4=0} = P_E(r,z_4)\big|_{z_4=0},\;\; U_D(\delta_2,\theta_2)\big|_{z_4=0} = U_E(r,z_4)\big|_{z_4=0} \quad \text{para } 0\le r\le R_E \tag{33,34}$$

Dicho sistema de ecuaciones se combinará con el método de colocación puntual en la siguiente la sección para obtener las amplitudes modales $A_n^+$, $A_n^-$, $B_n^{(1)}$, $B_n^{(2)}$, $D_n^{(1)}$, $D_n^{(2)}$, $E_n^+$ y $E_n^-$.

### 2.2. Colocación puntual

En la interfase de transición entre los conductos *A* y *B* se utilizan las condiciones de continuidad de presión y velocidad axial dadas por las Ecs. (29) y (30), y por tanto al tomar $N_{c_AB}$ puntos de colocación se cumple que

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left(A_n^+ + A_n^-\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_A}r_p\right) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(B_n^{(1)}\,\Theta_{B,n}^{(1)}(\delta_{1p},\theta_{1p}) + B_n^{(2)}\,\Theta_{B,n}^{(2)}(\delta_{1p},\theta_{1p})\right) \tag{35}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty}k_{A,n}\left(A_n^+ - A_n^-\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_A}r_p\right) = \mathrm{j}\sum_{n=0}^{\infty}\left(B_n^{(1)}\,\Xi_{B,n}^{(1)}(\delta_{1p},\theta_{1p}) + B_n^{(2)}\,\Xi_{B,n}^{(2)}(\delta_{1p},\theta_{1p})\right) \tag{36}$$

para $p$ = 1, 2, 3, …, $N_{c_AB}$. Los puntos de colocación tienen coordenadas $r_p$ y $z_{1p}$ = 0 (y por ello en este último caso las exponenciales dependientes de $z_1$ valen la unidad en las Ecs. (35) y (36)) en el sistema cilíndrico del conducto *A*, y pueden ser elegidos mediante distintos criterios [15], entre los cuales se opta en este trabajo por el de distribución espacial *equiespaciada*. En el sistema esférico del tronco de cono (conducto *B*) las coordenadas correspondientes son $\delta_{1p}$ y $\theta_{1p}$, y vienen dadas por:

$$\delta_{1p}=\sqrt{Vert_{B1}^2+r_p^2},\quad \theta_{1p}=\operatorname{atan}\left(\frac{r_p}{Vert_{B1}}\right),\quad Vert_{B1}=\frac{R_A\,L_B}{R_C-R_A} \tag{37-39}$$

En la transición entre los conductos *B* y *D* (monolito), las relaciones entre presiones y velocidades asociadas a la matriz $\mathbf{T}^m$, dadas por las Ecs. (31) y (32), se fuerzan en $N_{c_BD}$ puntos de colocación (con la misma coordenada $r_p$ a ambos lados del monolito)

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left(B_n^{(1)}\,\Theta_{B,n}^{(1)}\left(\delta_{1p},\theta_{1p}\right)+B_n^{(2)}\,\Theta_{B,n}^{(2)}\left(\delta_{1p},\theta_{1p}\right)\right) \tag{40}$$
$$=T_{11}^m\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Theta_{D,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Theta_{D,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)+\frac{T_{12}^m}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Xi_{D,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Xi_{D,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)$$

$$-\frac{1}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\sum_{n=0}^{\infty}\left(B_n^{(1)}\,\Xi_{B,n}^{(1)}\left(\delta_{1p},\theta_{1p}\right)+B_n^{(2)}\,\Xi_{B,n}^{(2)}\left(\delta_{1p},\theta_{1p}\right)\right) \tag{41}$$
$$=T_{21}^m\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Theta_{D,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Theta_{D,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)+\frac{T_{22}^m}{\mathrm{j}\omega\rho_0}\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Xi_{D,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Xi_{D,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)$$

para $p$ = 1, 2, 3, …, $N_{c_BD}$. Los puntos de colocación en el tronco de cono divergente (conducto *B*) tienen coordenadas $\delta_{1p}$ y $\theta_{1p}$ dadas por

$$\delta_{1p}=\sqrt{Vert_{B2}^2+r_p^2},\quad \theta_{1p}=\operatorname{atan}\left(\frac{r_p}{Vert_{B2}}\right),\quad Vert_{B2}=\frac{R_C\,L_B}{R_C-R_A}=Vert_{B1}+L_B \tag{42-44}$$

En el caso de los puntos de colocación en el tronco de cono convergente (conducto *D*) se tiene que $\delta_{2p}$ y $\theta_{2p}$ están dadas por

$$\delta_{2p}=\sqrt{Vert_{D2}^2+r_p^2},\quad \theta_{2p}=\operatorname{atan}\left(\frac{r_p}{Vert_{D2}}\right),\quad Vert_{D2}=\frac{R_C\,L_D}{R_C-R_E} \tag{45-47}$$

Por último, en la interfase de transición entre los conductos *D* y *E*, las condiciones de continuidad de presión y velocidad axial dadas por las Ecs. (33) y (34) se cumplen en $N_{c_DE}$ puntos de colocación

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Theta_{B,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Theta_{B,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)=\sum_{n=0}^{\infty}\left(E_n^{+}+E_n^{-}\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_E}r_p\right) \tag{48}$$

$$-\mathrm{j}\sum_{n=0}^{\infty}\left(D_n^{(1)}\,\Xi_{D,n}^{(1)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)+D_n^{(2)}\,\Xi_{D,n}^{(2)}\left(\delta_{2p},\theta_{2p}\right)\right)=\sum_{n=0}^{\infty}k_{E,n}\left(E_n^{+}-E_n^{-}\right)\mathrm{J}_0\left(\frac{\alpha_n}{R_E}r_p\right) \tag{49}$$

para $p$ = 1, 2, 3, …, $N_{c_DE}$. En este caso, los puntos de colocación tienen coordenadas $r_p$ y $z_{4p}$ = 0 en el sistema cilíndrico (conducto *E*). En el sistema esférico del tronco de cono (conducto *D*), las coordenadas $\delta_{2p}$ y $\theta_{2p}$ vienen dadas por:

$$\delta_{2p}=\sqrt{Vert_{D1}^2+r_p^2},\quad \theta_{2p}=\operatorname{atan}\left(\frac{r_p}{Vert_{D1}}\right),\quad Vert_{D1}=\frac{R_E\,L_D}{R_C-R_E} \tag{50-52}$$

### 2.3. Truncado y cálculo de las amplitudes modales

A partir de las igualdades definidas por las Ecs. (35), (36), (40), (41), (48) y (49) se dispone de un sistema de 2 $N_{c_AB}$ + 2 $N_{c_BD}$ + 2 $N_{c_DE}$ ecuaciones. Las expansiones modales pueden truncarse para $n = N_t$, generando 8 ($N_t$ + 1) incógnitas. Las condiciones habituales para el cálculo de la atenuación mediante el *TL* [15] implican

$$A_0^+ = 1, \quad A_n^+ = 0 \ \forall n \quad \text{onda plana incidente} \qquad E_n^- = 0 \ \forall n \quad \text{terminación anecoica} \quad (53\text{-}55)$$

con lo cual el número de incógnitas queda reducido a 6 ($N_t$ + 1). Para conseguir el mismo número de ecuaciones e incógnitas, una combinación inmediata es $N_{c_AB} = N_{c_BD} = N_{c_DE} = N_t + 1 = N_c$. Resuelto el sistema de ecuaciones y obtenidas las amplitudes modales $A_n^-$, $B_n^{(1)}$, $B_n^{(2)}$, $D_n^{(1)}$, $D_n^{(2)}$ y $E_n^+$, el *TL* viene dado por [15,22]

$$TL = -20 \log \left| E_0^+ \right| \quad (53)$$

## 3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

### 3.1. Validación de la técnica de colocación puntual

La configuración geométrica seleccionada se define por medio de los siguientes valores [2,3]: conductos de entrada y salida de longitud $L_A = L_E$ = 0.1 m, transiciones troncocónicas con longitud de valor $L_B = L_D$ = 0.03 m, monolito con capilares definidos mediante $L_C$ = 0.135 m, radios de los conductos implicados dados por $R_A = R_E$ = 0.0268 m y radio del monolito cilíndrico $R_C$ = 0.0886 m. De esta forma, los semiángulos de apertura son $\theta_{1,0} = \theta_{2,0}$ = 64.106º. Para el monolito, se asume que los conductos capilares tienen sección transversal cuadrada [1,14], con una resistividad R = 500 rayl/m y una porosidad $\phi$ = 0.8 como valores por defecto. En los cálculos analíticos se consideran dos conjuntos de puntos de colocación con $N_{c1}<N_{c2}$; en cuanto a los cálculos numéricos, la malla de elementos finitos está formada por elementos cuadriláteros cuadráticos axisimétricos de 8 nodos, con un tamaño uniforme de valor 0.0025 m aproximadamente. Los resultados se muestran en la Fig. 2, que incluye adicionalmente predicciones basadas en un modelo de onda plana [1]. Como puede observarse, las predicciones analíticas convergen adecuadamente y guardan gran similitud con las basadas en elementos finitos, lo cual permite validar los desarrollos analíticos de colocación puntual presentados en las secciones previas. Las predicciones basadas en onda plana presentan buena concordancia con el resto de resultados a bajas frecuencias, por debajo de 500 Hz, tal como cabe esperar, pero empeoran considerablemente a frecuencias mayores.

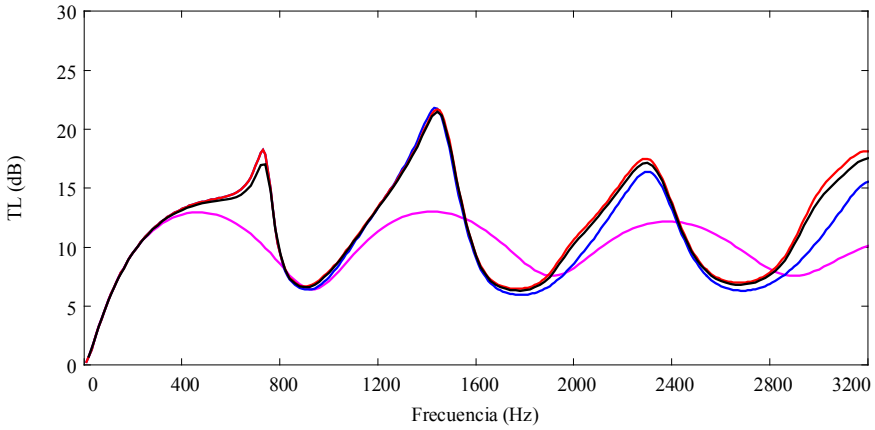



Figura 2 - *TL* de catalizador cónico: —, onda plana [1]; —, elementos finitos [6]; —, colocación puntual, $N_{c2}$; —, colocación puntual, $N_{c1}$.

### 3.2. Influencia de la porosidad

En esta sección se repiten las simulaciones mostradas en las referencias [2,3], pero ahora los cálculos se realizan en base a la técnica de colocación puntual en lugar de recurrir al método de ajuste modal. La Fig. 3 muestra la influencia de la porosidad del monolito en el *TL*, para los valores $\phi$ = 0.7, 0.8 y 0.9. El resto de dimensiones y propiedades se mantiene igual que en el caso de la figura anterior. Puede observarse que una reducción de la porosidad origina una disminución de la atenuación a baja frecuencia (primera cúpula de atenuación). Este resultado es consistente con las predicciones de estudios previos [1,13], pero se opone a los resultados de otras referencias [11,12]. Tal como se indica en [3], esta aparente contradicción se justifica dado que en los trabajos [1,13] se asume que los cambios en la porosidad no tienen efecto en la resistividad, lo cual no es posible salvo que algún parámetro adicional asociado con el monolito también se modifique. Un análisis más detallado [10] muestra una dependencia entre $R$ y $\phi$, dada por $R = 8\,\mu\,q^2\,s_f / (l_p\,\phi)$, donde $q$, $s_f$ y $l_p$ son, respectivamente, la tortuosidad, el factor de forma y el semiancho del conducto capilar. Para frecuencias superiores a 800 Hz aproximadamente, por encima de la primera cúpula de atenuación, las predicciones discrepan respecto a lo anterior, con un mayor *TL* asociado a menor porosidad cuando la frecuencia aumenta.

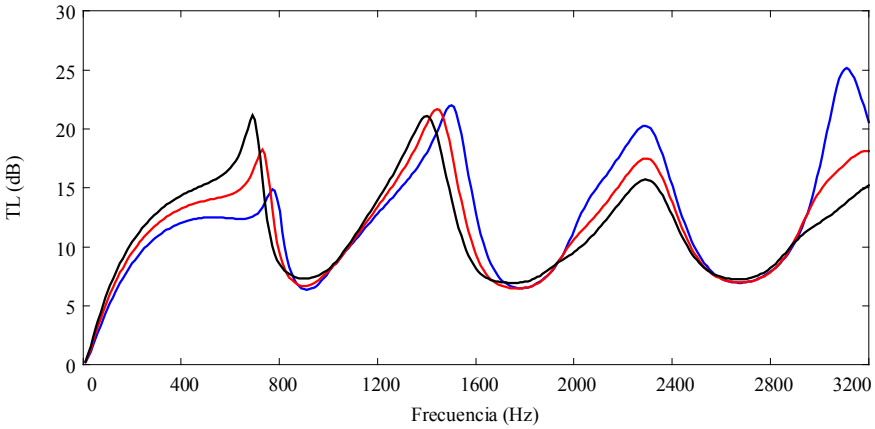



Figure 3 - TL de catalizador cónico obtenido mediante colocación puntual: —, $\phi$ = 0.7; —, $\phi$ = 0.8; —, $\phi$ = 0.9.

### 3.3. Influencia de la resistividad

Se muestra aquí el efecto de la resistividad de monolito en la atenuación acústica del catalizador. Como en el caso anterior, se recurre a las configuraciones previamente estudiadas en las referencias [2,3]; los resultados mostrados en el trabajo actual, sin embargo, se han obtenido mediante la técnica de colocación puntual. Los resultados del modelo analítico de colocación se pueden observar en la Fig. 4 para tres valores de resistividad dados por $R$ = 500 rayl/m, 750 rayl/m y 1000 rayl/m, así como una porosidad $\phi$ = 0.8. Tal como se indica en [3], en comparación con la influencia de la porosidad, ahora la atenuación del catalizador presenta una tendencia más homogénea en todo el rango de frecuencia de interés, dado que mayores resistividades proporcionan mayores índices de pérdidas de transmisión, excepto en pequeños intervalos de frecuencia cercanos a los picos de atenuación. A baja frecuencia, la influencia de la resistividad es menor, al igual que ya se ha mostrado en trabajos anteriores [2,3].

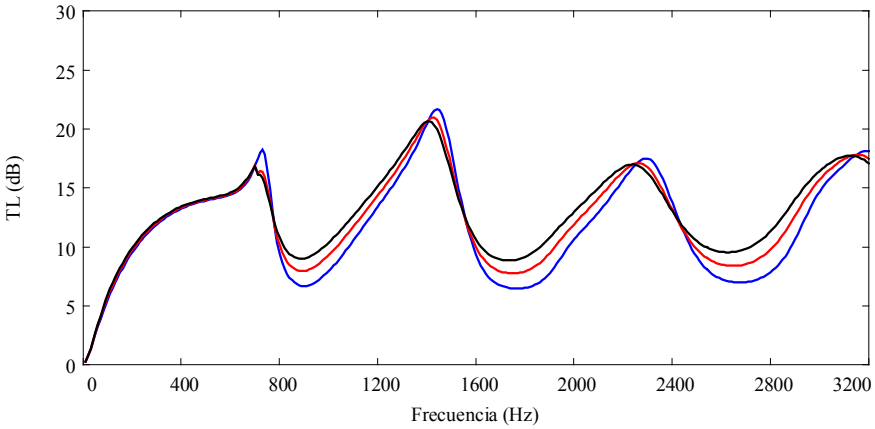



Figure 4 - TL de catalizador cónico obtenido mediante colocación puntual: ——, $R$ = 500 rayl/m; ——, $R$ = 750 rayl/m; ——, $R$ = 1000 rayl/m.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una técnica analítica basada en colocación puntual para la simulación acústica de dispositivos de la línea de escape de motores de combustión, tales como catalizadores. Dicho modelo permite considerar la presencia de modos de orden superior en geometrías axisimétricas formadas por conductos circulares y cónicos y monolito circular. El procedimiento propuesto combina la colocación por puntos con las funciones de Hankel esféricas y de Legendre para los conductos cónicos y las funciones de Bessel en las regiones cilíndricas. El comportamiento acústico del monolito se ha enfocado mediante un modelo 3D/1D, en el que se sustituye el convertidor catalítico por una matriz de transferencia de tipo unidimensional (resultados previos han establecido que dicha aproximación es más consistente con las características acústicas reales de los conductos capilares que integran el monolito). Dicho modelo ha sido aplicado con éxito en trabajos anteriores mediante el método de elementos finitos y el de ajuste modal, y en la presente investigación se ha abordado su extensión a la técnica de colocación puntual para reducir el coste computacional asociado a los cálculos. De esta forma, se asume que el campo acústico puede ser tridimensional en los conductos de entrada y salida, pero no es posible la existencia de modos de orden superior en el monolito.

La técnica de colocación puntual se ha validado de manera satisfactoria con resultados numéricos obtenidos mediante el método de elementos finitos. Además, se ha analizado el efecto de la porosidad y la resistividad del monolito en la atenuación acústica del catalizador.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo recibido del Ministerio de Economía y Competitividad (proyecto TRA2013-45596-C2-1-R), así como de la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport (proyecto Prometeo/2012/023).

## REFERENCIAS

[1] A. Selamet, V. Easwaran, J. M. Novak, R. A. Kach, Wave attenuation in catalytic converters: reactive versus dissipative effects, Journal of the Acoustical Society of America, 103 (1998), 935–943.
[2] F. D. Denia, L. Baeza, R. Kirby, A. Selamet, A multidimensional analytical study of sound attenuation in catalytic converters, 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-noise), Lisboa, Portugal, (2010).
[3] F. D. Denia, J. Martínez-Casas, J. Albelda, F. J. Fuenmayor, Atenuación de ruido en dispositivos de postratamiento de MCIA. Modelado analítico modal multidimensional, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España, (2010).
[4] A. G. Antebas, Contribución al modelado acústico de la línea de escape en motores de combustión. Aplicación a silenciadores y catalizadores, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, (2010).
[5] C. Jiang, T. W. Wu, M. B. Xu, C. Y. R. Cheng, BEM modeling of mufflers with diesel particulate filters and catalytic converters, Noise Control Engineering Journal, 58 (2010), 243-250.
[6] F. D. Denia, J. Martínez-Casas, L. Baeza, F. J. Fuenmayor, Acoustic modelling of exhaust devices with nonconforming finite element meshes and transfer matrices, Applied Acoustics, 73 (2012), 713-722.
[7] G. Kirchhoff, Ueber den einfluss der wärmeleitung in einem gase auf die schallbewegung, Annalen der Physik und Chemie, 134 (1868), 177-193.
[8] C. Zwikker, C. W. Kosten, Sound Absorbing Materials, Elsevier (1949).
[9] M. R. Stinson, The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape, Journal of the Acoustical Society of America, 89 (1991), 550-558.
[10] H. S. Roh, W. P. Arnott, J. M. Sabatier, R. Raspet, Measurement and calculation of acoustic propagation constants in arrays of small air-filled rectangular tubes, Journal of the Acoustical Society of America, 89 (1991), 2617-2624.
[11] E. Dokumaci, Sound transmission in narrow pipes with superimposed uniform mean flow and acoustic modelling of automobile catalytic converters, Journal of Sound and Vibration, 182 (1995), 799-808.
[12] E. Dokumaci, On transmission of sound in circular and rectangular narrow pipes with superimposed mean flow, Journal of Sound and Vibration, 210 (1998), 375-389.
[13] F. D. Denia, A. G. Antebas, R. Kirby, F. J. Fuenmayor, Multidimensional acoustic modelling of catalytic converters, 16th International Congress on Sound and Vibration, Cracovia, Polonia (2009).
[14] J. F. Allard, N. Atalla, Propagation of Sound in Porous Media, Wiley (2009), ISBN 978-0-470-746615-0
[15] M. L. Munjal, Acoustics of Ducts and Mufflers, Wiley (2014), ISBN 978-1-118-44312-5.
[16] R. Glav, The point-matching method on dissipative silencers of arbitrary cross-section, Journal of Sound and Vibration, 189 (1996), 123-135.
[17] R. Glav, The transfer matrix for a dissipative silencer of arbitrary cross-section, Journal of Sound and Vibration, 236 (2000), 575-594.
[18] R. Kirby, J.B. Lawrie, A point collocation approach to modelling large dissipative silencers, Journal of Sound and Vibration, 286 (2005), 313-339.

[19] R. Kirby, Transmission loss predictions for dissipative silencers of arbitrary cross section in the presence of mean flow, Journal of the Acoustical Society of America, 114 (2003), 200-209.
[20] L. Yang, Z. L. Ji, T. W. Wu, Transmission loss prediction of silencers by using combined boundary element method and point collocation approach, Engineering Analysis with Boundary Elements, 61 (2015), 265-273.
[21] F. D. Denia, E. M. Sánchez-Orgaz, L. Baeza, R. Kirby, Point collocation scheme in silencers with temperature gradient and mean flow, Journal of Computational and Applied Mathematics, 291 (2016), 127-141.
[22] R. Kirby, F. D. Denia, Analytic mode matching for a circular dissipative silencer containing mean flow and a perforated pipe, Journal of the Acoustical Society of America, 122 (2007), 3471-3482.
[23] M. Willatzen, The influence of a liquid flow on sound fields confined by conical walls, Journal of Sound and Vibration, 248 (2001), 847-863.
[24] F. D. Denia, F. J. Fuenmayor, J. Carballeira, Three-dimensional analysis of mufflers with conical ducts. Analytical, numerical and experimental Studies, Internoise 2003, 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Jeju, Corea (2003).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CAJAS ACÚSTICAS Y ALTOPARLANTES CONSTRUIDOS A PARTIR DE MADERA DE KRANTHOUT

PACS: 43.38.-p

Herrera Martínez, Marcelo; Reyes, María Fernanda
Universidad de San Buenaventura
Carrera 8 H n.° 172-20 | PBX: (57) 1- 667 1090
Bogotá, Colombia
mherrera@usbbog.edu.co

**RESUMEN**

El Desarrollo Sostenible consiste de tres partes fundamentales y cohesionadas entre sí: El Desarrollo Ambiental, Social y Económico. Un elemento clave para su fortalecimiento, son todos los procesos de reciclaje, desde todo punto de vista. El presente proyecto desarrolla membranas de alto-parlantes y cajas acústicas con materiales no-convencionales como madera de café y materiales reciclables como la madera de Kranthout.

## INTRODUCCIÓN

La Ciencia de Materiales aborda de una manera física y rigurosa, la teoría y los procedimientos para poder conocer, aplicar y apropiar diversos tipos de materiales en la construcción de diversos dispositivos acústicos y mecánicos.

En acústica, la incursión de materiales reciclables puede evidenciarse en la construcción de barreras acústicas, para mitigar el ruido de tráfico rodado, o el ruido de naturaleza aérea (aeronaves, aeropuertos), y en este caso, en la construcción de cajas acústicas para innovar con diseños y materiales en esta industria.

En este caso, los materiales para dispositivos acústicos (como barreras, silenciadores y particiones) y para dispositivos electroacústicos (micrófonos, altoparlantes y cajas acústicas), poseen características específicas para poder lograr tener un rendimiento y unas propiedades adecuadas. En el caso de los sistemas electroacústicos, propiedades como la Respuesta en Frecuencia, el Patrón Polar Directivo y la Impedancia de Radiación (Acústica, Mecánica y Específica), son decisivos para su caracterización.

En el presente proyecto se describe el diseño e implementación de éstos sistemas, concretamente membranas de parlantes y paredes de cajas acústicas de materiales no-convencionales como la madera de Café y la madera de Kranthout.

## CAJAS Y PARLANTES IMPLEMENTADOS CON MADERA DE CAFÉ

Como ejemplos de implementaciones realizadas con materiales no-convencionales, tenemos realizaciones con madera de café. De este material se elaboraron los parlantes y las cajas acústicas.

Se procedió a medir los parámetros de elasticidad, como el módulo de Young de este material. Recordemos que el comportamiento elástico de las membranas de parlantes está relacionado con la expresión (Skvor, 2009):

$$F = \frac{1}{C_m} x \qquad [2]$$

En donde x es el desplazamiento.



Fig. 1. Membranas de altoparlantes implementados con madera de café

**Tabla 1.** Parámetros de Thiele-Small (Pueo & Roma, 2003) de los parlantes medidos.

| Parámetros de Thiele-Small | |
|---|---|
| **Parlante de café** | |
| Frecuencia de resonancia. Fs [Hz] | 500 |
| Resistencia de la bobina en D.C, Re [Ω] | 7,26 |
| Factor mecánico de calidad, Qms | 1,431 |
| Factor eléctrico de calidad, Qes | 0,0105 |
| Factor de calidad Total, Qts | 0,0104 |
| Volumen de aire equivalente a Cms, Vas [L] | 0,12 |
| Compliancia mecánica, Cms [µm/N] | 110,75 |
| Superficie efectiva, Sd [$m^{2]}$ | 0,00282 |

**CAJAS Y PARLANTES IMPLEMENTADOS CON MADERA DE KRANTHOUT**

El material Newspaperwood fue inventado por Mieke Meijer, desarrollado en cooperación con y bajo la licencia de diseño Vij5. Consiste en el reciclaje de excedente de papel, conformando periódico de madera. El resultado es sorprendente, con propiedades de sólido, de madera y también pueden generarse variaciones como por aserrado, fresado, lijado, tratamiento con cera, aceite o barniz claro.



Fig. 2. Elementos realizados con madera reciclada

La primera etapa es reciclar periódicos, con el propósito de compactarlos y realizar una especie de tronco fuerte usando pegamentos sin disolventes (ver Fig. 3).




Fig. 3. Tronco compacto implementado con reciclaje de papel

Posterior a este proceso, se procede a cortar el “tallo” de Kranthout para ser moldeado con la forma de la estructura a realizarse; debido a que éste es producto del apilamiento de periódicos, es necesario realizarlo con una cortadora de madera. Es necesario aclarar que el Kranthout es un material resistente con propiedades similares de rigidez que la manera, por ende puede ser cortada y lijada como si fuera el tronco de un árbol.

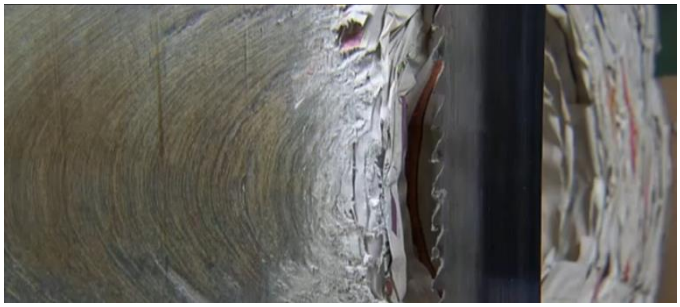


Fig. 4. Material de Kranthout

Con el objetivo de optimizar proceso y disminuir las emisiones de CO2 al producir materiales como el plástico o de altos contenido de polietileno, se realiza el reciclaje de elementos plásticos. Donde el proceso de reciclaje comienza por la selección de los materiales dependiendo de su color y su composición química. Posteriormente se procede a descomponer la morfología de las estructuras a reciclar, por medio de la fragmentación del plástico, lo que da lugar a polímeros sin forma específica, para su posterior tratamiento químico.

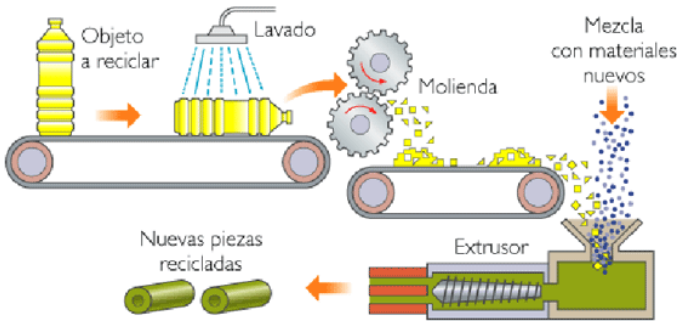



Fig. 5. Proceso de reciclaje para la obtención de Madera de Kranthout

Luego que los materiales han sido seleccionados y procesados, se diseña la caja acústica; midiéndose las características intrínsecas del parlante teniendo como referente los parámetros de Thiele-Small.

Los parámetros de Thiele-Small son:

Fs: Frecuencia de resonancia del parlante al aire libre (sin bafle y lejos de superficies reflectantes)
Qms: Factor de mérito debido a las pérdidas mecánicas
Qes: Factor de mérito debido a las pérdidas eléctricas
Re: Resistencia eléctrica de la bobina en corriente continua.
Res: Resistencia eléctrica equivalente a la fricción de la suspensión.
Vas: Volumen cuya compliancia acústica equivale a la de la suspensión.
Le: Inductancia de la bobina.

## METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el proyecto es dividida en las siguientes fases:

Fase 1: Identificación de las técnicas de reciclaje y de las implementaciones de cajas acústicas. Estado-del-arte de las técnicas de reciclaje adecuadas para construir a partir del Kranthout, un material adecuado para la implementación de una caja acústica. Así mismo, se identifican las cajas acústicas que existen en el mercado.

Fase 2: Comparación de las técnicas de reciclaje y comparación de las distintas cajas acústicas. Se realiza una comparación entre las distintas técnicas de reciclaje, y así mismo de los distintos tipos de cajas acústicas.

Fase 3: Identificación de las herramientas. Se procede a identificar las herramientas con las cuales se puede:

- Realizar el proceso de reciclaje, para obtener el material adecuado para la construcción de la caja acústica.
- Realizar la simulación del sistema de sonido (la caja acústica), para verificar sus propiedades de radiación, así como sus propiedades acústicas, mecánicas y eléctricas.
- Realizar la implementación de la caja acústica

Fase 4: Selección de una herramienta computacional, y simulación del sistema. Aquí se realiza la selección de una herramienta computacional para simular el sistema de sonido (la caja acústica).

Fase 5: Implementación de la caja acústica. Se implementa un sistema de sonido, denominado “caja acústica”, el cual estará elaborado de materiales reciclables.

## SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución que se propone es la implementación de una caja acústica con material de Kranthout. Esto se enmarca dentro de las dimensiones de sostenibilidad (económica, social y ambiental), ya que se realiza una solución que es ecológicamente amigable, baja en costos y que tiene un impacto social claro.

Las cajas acústicas son hechas de papel reciclado, mezclado con cartón y yeso, o escayola para obtener mayor consistencia, logrando propiedades de absorción necesarias en la construcción de una caja. La idea es fabricar unas cajas de 1,5 cm a 2 cm de espesor con este material, para una potencia de unos 60 Watios RMS. La parte final trata acerca del refuerzo se reforzaría con vinilo autoadhesivo.

La cuestión es también que si el frontal donde van los altavoces, es recomendable ponerlo de madera o se puede hacer con una capa más gruesa (de unos 3-4 cm) para que aguante el peso de los altavoces.

## CONCLUSIONES

Los materiales reciclables pueden ser utilizados para la implementación de cajas acústicas, en concreto el material denominado KRANTHOUT.
Las cajas acústicas con materiales reciclables representan una posibilidad de utilización conveniente de materiales y desechos, que de otro lado no tendrían una posibilidad de reúso en la sociedad.
De otro lado, con el proyecto, se puede lograr una reducción significativa en los precios nominales de las cajas acústicas, y ésto representa otra ventaja del proyecto.

**REFERENCIAS**

Skvor, Z. (2009). Akustika a Elektroakustika. Akademia, Czech Rep.

Pueo, B. & Roma, R. (2003). Electroacústica, Altavoces y Micrófonos, Editorial McGrawHill.

Barron, R. F. (2002). Industrial Noise Control and Acoustics. CRC Press, -Technology & Engineering 11(14).

Kadlec, F. (2002). Zpracování akustických signálů. Praha: ČVUT.

Kinsler, L. (2000). Fundamentals of Acoustics. Editorial Illustrated. 4 ed.

Beranek L.(1969). Acústica. Editorial Hispano Americana S.A. 2ª ed.

Möser, M. (2009). Engineering Acoustics. Editorial: Springer.

Fahy, F. (2001). Foundations of Engineering Acoustics.

Schiffman, H. R. (1997). La Percepción Sensorial, México: Limusa.

Gelfand, S. A. (2010). Hearing: An Introduction to Psychological And Physiological Acoustics, 5Ed.

Impedancia de altavoces. {en línea} tomado el 28 de agosto de 2013. Disponible en: http://www.doctorproaudio.com/content.php?6-Impedancia-altavoces-resistencia-nominal.

Pueo, B. & Roma, R. (2005). Electroacústica, Altavoces y Micrófonos, Editorial McGrawHill.

Skvor, Z. (2010). Vibrating Systems and their equivalent circuits. Editorial Elsevier.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ABSORCIÓN ACÚSTICA DE HORMIGÓN PERFORADO

PACS:

Jesús Carbajo[1]; Tomás Vicente Esquerdo[2]; Antonio Vicente Nadal-Gisbert[3]; Jaime Ramis[1]; Francisco D. Denia[4].
[1] Departamento de Física, Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España
{jesus.carbajo@ua.es, jramis@ua.es}
[2] Instituto de Diseño para la Fabricación y Producción Automatizada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{toesllo1@mcm.upv.es}
[3] Instituto de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{anadal@mcm.upv.es}
[4] Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{fdenia@mcm.upv.es}

## ABSTRACT

Perforated concrete shows a high potential in architectural construction elements whose design is desired to be aesthetic for decoration and to provide good brightness for indoor applications without losing structural strength. This paper deals with manufacturing and characterization of acoustic and non-acoustic properties of various small-scale samples of perforated concrete. Non-perforated specimen data is used along with a homogenization technique based model to describe the sound propagation in the proposed materials, made up of two interconnected porous networks with different characteristic size. The model is validated by comparing the predictions for the sound absorption coefficient with the experimental results.

## RESUMEN

El hormigón perforado presenta un elevado potencial arquitectónico en elementos de construcción con cuyo diseño se desea conseguir una decoración estética y buena luminosidad para interiores sin perder robustez estructural. Este trabajo presenta la fabricación y caracterización de las propiedades acústicas y no acústicas de distintas muestras a pequeña escala de hormigón perforado. A partir de la información obtenida en especímenes sin perforar y aplicando un modelo basado en técnicas de homogeneización, es posible describir la propagación sonora en los materiales propuestos, en los que se interconectan redes porosas de diferente tamaño característico. El modelo se ha validado comparando sus predicciones para el coeficiente de absorción con resultados experimentales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mejora de las prestaciones acústicas de los elementos constructivos resulta de gran interés en el sector de la edificación [1]. Los materiales porosos, tales como fibras y espumas, se emplean comúnmente para reducir la transmisión de ruido aéreo y estructural en un gran número de soluciones en este ámbito. Sin embargo, estos materiales presentan una baja resistencia estructural y durabilidad, especialmente cuando están expuestos a agentes medioambientales (lluvia, nieve, viento,…), mostrando una notable disminución de su rendimiento acústico con el paso del tiempo. Alternativamente, es habitual recurrir a elementos elaborados íntegramente a partir de hormigón, cuya elevada rigidez y robustez estructural evita la necesidad de emplear marcos o soportes adicionales. Asimismo, al ser un material inherentemente poroso, resulta viable trabajar con distintos tamaños de poro para conseguir una aceptable absorción acústica, adaptándose en cada caso a las restricciones estructurales de diseño. Los principales inconvenientes de este tipo de soluciones son su elevado peso y la dificultad para controlar el proceso de consolidación que condiciona el rendimiento acústico de la mezcla granular final. El uso de perforaciones en el hormigón no solo presenta las ventajas anteriormente citadas, sino que además permite reducir su peso final y por tanto el coste asociado al mismo.

Los paneles perforados son absorbentes sonoros comúnmente utilizados en aplicaciones de control de ruido, produciéndose el fenómeno de absorción acústica por las pérdidas viscosas en sus poros u orificios. Existen un gran número de trabajos [2-5] que modelan la impedancia acústica de estos dispositivos, pudiendo determinarse su comportamiento acústico a partir del diámetro de dichos orificios, la tasa de perforación o porosidad y el espesor del panel. Aunque algunos autores han estudiado configuraciones más complejas [6-9], la mayoría consisten típicamente en una superficie rígida plana con orificios distribuidos periódicamente a lo largo de la misma. Sin embargo, cuando la parte no perforada del panel es a su vez un material poroso cuyo tamaño de poro es menor que el de las perforaciones (como es el caso del hormigón poroso), también deben tenerse en cuenta los mecanismos de pérdidas asociados al primero. Existen en la literatura varios modelos [10-13] que permiten modelar acústicamente medios granulares como puede ser el caso del hormigón poroso. Al material resultante de perforar un medio poroso se le conoce como material meso-perforado o de doble porosidad, dado que se compone de dos redes porosas de diferente tamaño característico. Olny y Boutin [14], basándose en un trabajo previo en el campo de la geofísica [15] que utilizaba un método de homogeneización, propusieron un modelo genérico para describir la propagación sonora en este tipo de materiales. Posteriormente, varios autores [16-19] han aplicado esta teoría al estudio de la absorción sonora de distintos materiales porosos, verificando experimentalmente que su coeficiente de absorción sonora puede estimarse satisfactoriamente con dicho modelo.

El hormigón perforado suele consistir en un panel fabricado a partir de un compuesto de mortero y árido grueso, sobre el que se realizan una serie de orificios o perforaciones. El efecto decorativo y estético que puede ofrecer un panel de este tipo, junto con los efectos de luces y sombras, resulta atractivo para arquitectos y constituye una opción interesante para múltiples aplicaciones y entornos (patios interiores, zonas de recreo,…). Si bien la trabajabilidad de los mismos no es muy buena (suelen emplearse moldes o matrices), en los últimos años se han desarrollado nuevos métodos de fabricación que recurren a sofisticadas técnicas digitales, facilitando enormemente esta labor [20, 21]. Estas últimas permiten producir paneles cuyo patrón presente distintas distribuciones o formas de orificio, consiguiendo perspectivas que favorecen la presencia visual del panel e invitan a plantear su diseño con fines acústicos.

Este trabajo presenta los resultados preliminares correspondientes a la absorción acústica de hormigón perforado. Para ello se han caracterizado las propiedades acústicas y no acústicas de distintas muestras a pequeña escala elaboradas a partir de arlita, un agregado ligero sostenible de reducido peso que además presenta una buena capacidad absorbente. A partir de la información obtenida en especímenes sin perforar y aplicando el modelo propuesto por Olny y Boutin [14], se ha estimado el coeficiente de absorción acústica de las muestras perforadas. Las predicciones se han comparado con los resultados experimentales obtenidos a partir de medidas en tubo de onda plana, obteniendo una buena correlación entre ambos.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Modelado acústico de materiales porosos

La propagación acústica en un medio poroso saturado con aire es difícil de estudiar a escala microscópica debido a la compleja geometría de su estructura. En su lugar, es común describir el comportamiento de las ondas acústicas a través del mismo adoptando una formulación macroscópica y considerando su esqueleto rígido para así modelarlo como un fluido equivalente. Este enfoque simplificado permite derivar expresiones complejas dependientes de la frecuencia para sus propiedades acústicas más relevantes, impedancia característica $Z_c$ y número de onda $k$

$$Z_c = \sqrt{\rho K} \tag{1}$$

$$k = \omega\sqrt{\rho / K} \tag{2}$$

donde $\omega$ es la frecuencia angular, $\rho$ y $K$ la densidad dinámica y el módulo de compresibilidad del fluido equivalente, respectivamente. Estas propiedades representan la fricción viscosa y los mecanismos de pérdidas térmicas en las paredes de los poros, estando relacionadas con el tamaño y proporción de éstos en el material.

Así, la impedancia de superficie $Z_s$ y el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal $\alpha$ de un material poroso de espesor $d$ colocado sobre una pared rígida pueden calcularse utilizando las siguientes expresiones

$$Z_s = -jZ_c \cot(kd) \tag{3}$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \tag{4}$$

siendo $\rho_0$ y $c_0$ la densidad del aire y la velocidad de propagación del sonido en éste, respectivamente.

### 2.2 Materiales granulares

Horoshenkov y Swift [13] propusieron unas expresiones de la densidad dinámica y el módulo de compresibilidad para medios granulares con una distribución estadística de tamaño de poro cercana a log-normal (habitual en este tipo de materiales). Dicho modelo ha sido utilizado con éxito anteriormente para analizar muestras de hormigón [22-24], motivando la elección del mismo en este trabajo para predecir las propiedades acústicas del material poroso granular base elaborado a partir de arlita. Estas ecuaciones pueden escribirse de la siguiente forma

$$\rho = \frac{\alpha_\infty}{\phi}\left( \rho_0 - j\frac{\sigma\phi}{\omega\alpha_\infty}\tilde{F}(\omega) \right) \tag{5}$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi}\left( \gamma - \frac{\rho_0(\gamma - 1)}{\rho_0 - j\frac{\sigma\phi}{\omega\alpha_\infty N_P}\tilde{F}(N_P\omega)} \right)^{-1} \tag{6}$$

donde $\alpha_\infty$ es la tortuosidad, $\phi$ es la porosidad, $\sigma$ es la resistividad al flujo, $\gamma$ la relación de calores específicos, $P_0$ la presión atmosférica y $N_P$ el número de Prandtl. $\tilde{F}(\omega)$ es la función de corrección de la viscosidad, que puede expresarse de forma aproximada como

$$\tilde{F}(\omega) \cong \frac{1 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2}{1 + b_1\varepsilon} \tag{7}$$

siendo $\varepsilon = \sqrt{j\omega\rho_0\alpha_\infty/(\sigma\phi)}$ un parámetro adimensional, $a_1 = \theta_1/\theta_2$, $a_2 = \theta_1$ y $b_1 = a_1$, donde $\theta_1$ y $\theta_2$ son los factores de forma, que se definen en función del tipo de geometría de poro asumida, siendo para el caso circular $\theta_1 = (4/3)e^{4\xi} - 1$ y $\theta_2 = \left(1/\sqrt{2}\right)e^{3\xi/2}$, con $\xi = \left(\sigma_p \ln 2\right)^2$, siendo $\sigma_p$ la desviación estándar de la distribución log-normal del tamaño de poro.

### 2.3 Materiales de doble porosidad

Considérese un material meso-perforado o de doble porosidad saturado con aire como el de la Figura 1, compuesto por dos redes porosas periódicas interconectadas cuyos tamaños característicos $l_M$ y $l_m$ difieren (en lo que sigue, los subíndices $M$ y $m$ hacen referencia a los mesoporos y microporos, respectivamente), siendo ambos mucho menores que la longitud de onda de trabajo

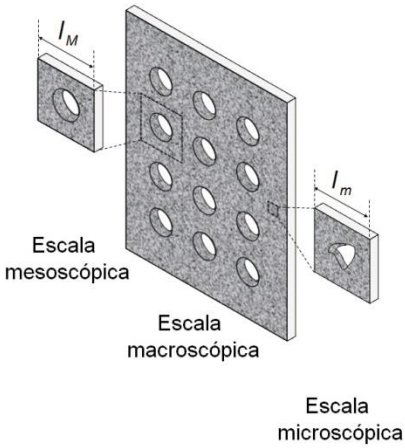



Figura 1 – Escalas de un material meso-perforado o de doble porosidad.

Olny y Boutin [14] propusieron un modelo macroscópico genérico basado en técnicas de homogenización que permite determinar la densidad dinámica $\rho_{dp}$ y el módulo de compresibilidad $K_{dp}$ de este tipo de medios. Dicha aproximación desprecia el movimiento de las partes sólidas del material (esqueleto rígido), asumiéndose además para el caso en estudio perforaciones de sección transversal circular y un bajo contraste entre escalas porosas (es decir, $l_m/l_M \approx 10^{-1}$, con lo que existe una fuerte interacción entre ambas redes porosas). Las expresiones de dichas propiedades para el material de doble porosidad vienen dadas entonces por

$$\rho_{dp} = \left(\frac{1-\phi_M}{\rho_m} + \frac{1}{\rho_M}\right)^{-1} \tag{8}$$

$$K_{dp} = \left(\frac{1}{K_M} + \frac{1-\phi_M}{K_m}\right)^{-1} \tag{9}$$

Así, para un material de doble porosidad como el que se pretende analizar, las propiedades del medio microporoso, $\rho_m$ y $K_m$, pueden calcularse utilizando las ecuaciones (5) y (6) del modelo de Horoshenkov y Swift [13] descrito anteriormente; mientras que en los mesoporos

puede usarse el modelo simplificado de Zwikker y Kosten [10] para el caso de perforaciones cilíndricas circulares de radio $R$, definiéndose la densidad dinámica $\rho_M$ y el módulo de compresibilidad $K_M$ del aire en el interior de las mismas según

$$\rho = \frac{\rho_0}{F(\omega)} \tag{10}$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1)F(N_P\omega)} \tag{11}$$

donde $F(\omega)$ se obtiene como

$$F(\omega) = 1 - \frac{2J_1\left(s\sqrt{-j}\right)}{s\sqrt{-j}J_0\left(s\sqrt{-j}\right)} \tag{12}$$

siendo $s = \sqrt{\omega\rho_0 R^2/\eta}$, $J_0$ y $J_1$ son funciones de Bessel cilíndricas de orden 0 y 1, respectivamente, y $\eta$ es la viscosidad dinámica del aire.

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Preparación de las muestras

En este trabajo se han estudiado distintas muestras a pequeña escala de hormigón sin perforar y perforado elaboradas a partir de agregados ligeros de arlita que difieren en términos de tamaño (en el rango de 2 a 8 mm) y forma (tipos A y B) del grano, así como en la densidad final (materiales 1-3). La arlita es un tipo de arcilla expandida aislante de origen cerámico, con una estructura altamente porosa, una excelente relación resistencia-peso, y unas propiedades termoacústicas que la hacen idónea para su uso en hormigones ligeros. Además, su carácter sostenible (puede reciclarse y no genera residuos peligrosos para el medio ambiente) hace que sea una interesante alternativa a otras soluciones comúnmente utilizadas. Las mezclas granulares se obtuvieron siguiendo el procedimiento descrito en [24]. En resumen, se mezcla el grano virgen de arlita con un mortero de cemento y agua durante 10-15 minutos y se disponen en moldes circulares de silicona de 72 mm de diámetro y 50 mm de espesor durante 48 horas antes de extraerlas para completar el proceso de curado en un periodo de 30 días a 23 ºC y una humedad relativa del 34 %. Los especímenes perforados se obtuvieron empleando dos técnicas de perforación: manual y moldeado. Se utilizó una taladradora sobre la muestra ya curada en el primer caso y unos moldes cilíndricos de metal (suplementarios a los de silicona) con antiadherente en el segundo. A algunas de las probetas resultantes se les realizaron perforaciones de entre 4 y 30 mm. La información referente a la preparación de las muestras se recoge en la Tabla 1. La Figura 2 presenta fotografías de algunas de las muestras analizadas.

Tabla 1 – Datos de preparación de las muestras de material granular.

| Mezcla granular | Tipo | Tamaño de grano (mm) | A/C/G (%) | Densidad (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|
| Material 1 | A | ≤ 4 | 17/33/50 | 650 |
| Material 2 | A | > 4 | 17/33/50 | 700 |
| Material 3 | B | ≥ 4 | 17/33/50 | 490 |

* A/C/G indica las proporciones de Agua, Cemento y material Granular de cada mezcla, respectivamente.




(a) (b) (c)

Figura 2 – Imágenes de hormigón elaborado a partir de arlita: (a) detalle de los dos tipos de granos virgen empleados (derecha: tipo A, izquierda: tipo B), (b) muestras sin perforar y perforadas preparadas para medidas en tubo de onda plana y (c) fotografía utilizando microscopio electrónico.

### 3.2 Caracterización de los materiales

En primer lugar se ha medido el coeficiente de absorción a incidencia normal de todas las muestras (no perforadas y perforadas) siguiendo el procedimiento descrito en la normativa ISO 10534-2:1998 [25]. El modelo teórico descrito en la Sección 2.2 se basa en cuatro propiedades físicas medibles (porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y desviación estándar de tamaño de poro) que se han determinado experimentalmente para las muestras granulares sin perforar. Así, a partir de estos valores, empleando la técnica de homogeneización del modelo de Olny y Boutin [14] es posible estimar las propiedades acústicas de los especímenes perforados y validar así la aplicabilidad de la misma a este tipo de materiales.

La porosidad abierta se ha medido usando una variante del método de Vasina et al. [26] en la que, en lugar de pesar las muestras antes y después de sumergirlas en agua, se miden directamente los volúmenes de la muestra y de agua desalojada (este último con un matraz). La tortuosidad se ha deducido utilizando un algoritmo de optimización basado en el método de búsqueda directa de Nelder-Mead [27]. Dicho método inverso ajusta las predicciones obtenidas para el coeficiente de absorción con el modelo de Horoshenkov y Swift [13] a los resultados obtenidos experimentalmente. Se ha escogido esta opción dadas las características pseudo-destructivas inherentes a los métodos químicos comúnmente adoptados para determinar ésta y que requieren del uso de un electrolito, aunque también existen otros métodos por ultrasonidos [28]. La resistividad al flujo se obtuvo empleando el método indirecto basado en medidas acústicas en tubo de onda plana propuesto por Ingard y Dear [29]. Ambos métodos de tubo de onda plana, el de la normativa ISO 10534-2:1998 y el recién mencionado, se llevaron a cabo con un equipo de medida y un tubo preparado al efecto cuyos detalles constructivos pueden consultarse en [24]. Por último, la desviación estándar de tamaño de poro se determinó ajustando teóricamente la distribución acumulativa de dicho tamaño obtenida experimentalmente utilizando el método de extracción de agua [30] a la integral de una distribución estadística de tipo log-normal [13], excepto para el material 3, para el que se determinó utilizando el mismo procedimiento inverso con el que se obtuvo la tortuosidad.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Propiedades físicas

La Tabla 2 resume las propiedades no acústicas de algunas de las muestras granulares sin perforar bajo estudio. La predicción de las propiedades acústicas, tanto de las muestras no perforadas como de las perforadas, se llevó a cabo utilizando los valores de esta tabla como datos de entrada en los modelos teóricos de la Sección 2.

Tabla 2 – Propiedades físicas medidas de las muestras granulares.

| Mezcla granular | Porosidad, $\phi$ | Tortuosidad, $\alpha_\infty$ | Res. flujo ($Nsm^{-4}$), $\sigma$ | Desv. estándar, $\sigma_p$ |
|---|---|---|---|---|
| Material 1 | 0.39 | 1.82* | 2176 | 0.21 |
| Material 2 | 0.38 | 1.87* | 1839 | 0.16 |
| Material 3 | 0.35 | 1.56* | 1507 | 0.24* |

* Valores obtenidos con el método numérico inverso referido en la Sección 3.2.

Los resultados de porosidad indican que las muestras preparadas ofrecen valores similares entre el 35 y el 40% para esta propiedad. Los valores de tortuosidad, aunque obtenidos inversamente, parecen presentar también valores de orden similar entre materiales. Por otra parte, los resultados de resistividad al flujo evidencian que ésta es inversamente proporcional al tamaño de las partículas de grano de las muestras (aunque en esta comunicación no se ha incluido la información de tamizado, el material 3 presenta granulometrías mayores que los otros dos), dado que la atenuación de la propagación sonora aumenta al reducir el tamaño de grano. Esta afirmación no es cierta para valores de resistividad excesivamente elevados, ya que ello implicaría valores demasiado altos de la impedancia característica y por tanto un peor acoplamiento de las impedancias aire-mezcla granular, produciendo una menor absorción sonora. Teniendo esto en cuenta, los tamaños de granos menores presentan unos valores de resistividad al flujo más elevados para los casos examinados. En cuanto a la desviación estándar de tamaño de poro, los valores ajustados se encuentran en el rango 0.16-0.24, siendo las muestras con granulometrías menores las que exhiben poros más pequeños.

### 4.2 Propiedades acústicas

El rendimiento acústico de los materiales granulares depende mayormente de su porosidad, del tamaño de los poros y de la distribución de éstos a lo largo del mismo. En el caso de los materiales perforados, hay que añadir el tamaño de las perforaciones. Aunque se entiende que en la práctica el hormigón perforado se emplea como un elemento autónomo, sin pared rígida detrás, se evaluará su absorción sonora para estas condiciones por simplicidad. Es propósito de los autores analizar otros parámetros que podrían resultar más fieles a situaciones reales, como las pérdidas por transmisión, aunque el parámetro escogido sirve también para validar la aplicabilidad de los modelos teóricos anteriores a este tipo de materiales. La Figura 3 muestra el coeficiente de absorción medido para algunas de las mezclas granulares no perforadas.

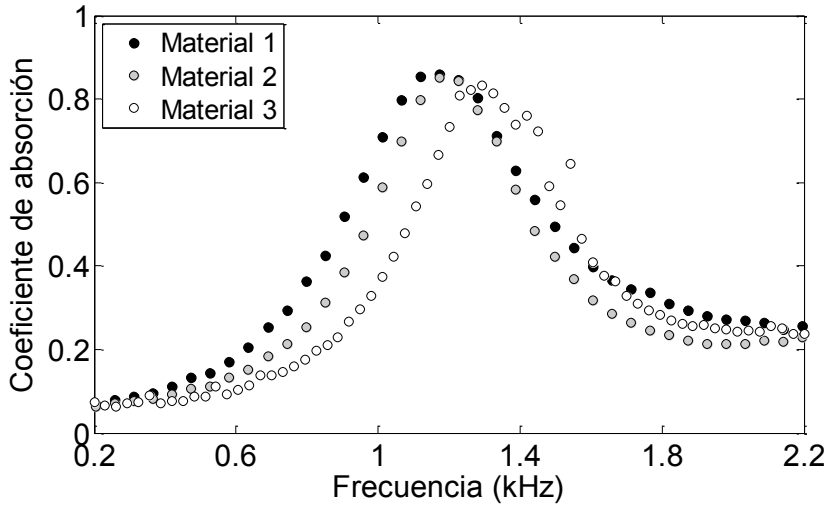



Figura 3 – Coeficiente de absorción sonora medido para diferentes muestras granulares.

Los experimentos en tubo de onda plana sugieren que la mezcla con menor tamaño de grano muestra una absorción sonora y un ancho de banda relativamente mayores. Por otra parte, el desplazamiento de la frecuencia de pico hacia bajas frecuencias puede derivarse también de un valor más alto de la resistividad al flujo, asociado a una mayor atenuación de las ondas acústicas en el material granular.

Para el caso de un material meso-perforado o de doble porosidad, y asumiendo éste periódico, suele considerarse un elemento con una sola perforación como representativo del mismo (siempre que el orificio esté ubicado simétricamente respecto a los límites de dicho elemento). La Figura 4 muestra el coeficiente de absorción para los materiales 2 y 3 cuando sobre éstos se practican perforaciones de distintos tamaños. Cabe señalar que en el primer caso (material 2) las perforaciones se realizaron con una taladradora, mientras que en el segundo (material 3) se emplearon unos moldes.

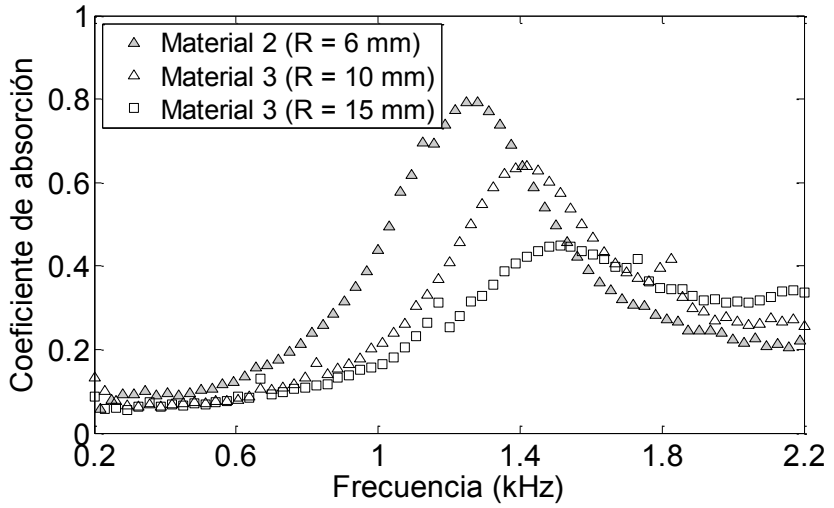
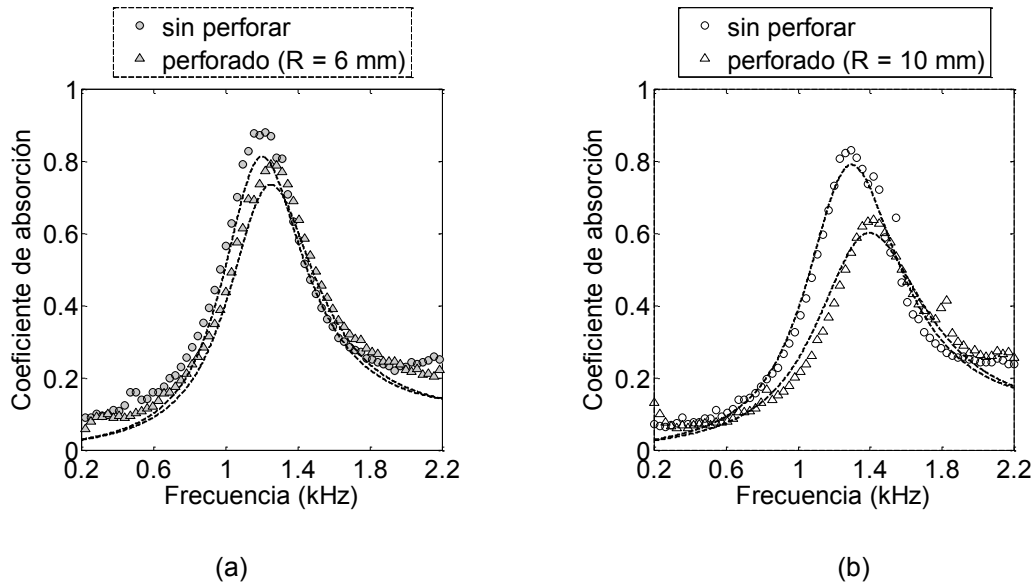



Figura 4 – Coeficiente de absorción sonora medido para diferentes muestras de hormigón perforado.

En ambos casos se puede apreciar que un mayor tamaño de perforación se traduce en una menor absorción sonora del material. A fin de obtener un incremento de este coeficiente de absorción deben seleccionarse cuidadosamente, no solo el material granular base, sino también el tamaño de los meso-poros. De hecho, Olny y Boutin [14] demostraron que este incremento es debido al efecto de difusión de presión que tiene lugar cuando existe un alto contraste entre escalas porosas, no siendo ese el propósito en las muestras preparadas y cuyo análisis se presenta en este trabajo.

### 4.3 Validación de los modelos

El modelo de Horoshenkov y Swift [13] permite predecir el comportamiento acústico de las mezclas granulares cuando se conocen sus propiedades físicas. Para el caso de las muestras meso-perforadas, a partir de dicha información y aplicando el modelo de Olny y Boutin [14], es posible también estimar éste. En la Figura 5 se verifica que las predicciones de ambos modelos y los ensayos en tubo de onda plana para muestras sin perforar y perforadas presentan una buena correlación en el rango de frecuencias de medida, si bien aparecen algunas discrepancias en altas frecuencias. En general, estas diferencias pueden deberse a las tolerancias de los dispositivos de medición, especialmente las de aquellos ensayos que emplean agua para determinar las propiedades físicas que sirven como datos de entrada a los modelos. Éstas también pueden ser el resultado de la rugosidad superficial de las probetas, del hecho de que no existe flujo de aire a través de los poros sin salida (poros conectados con el exterior solamente en un extremo de la muestra) o de que ambos modelos asumen un medio de longitud infinita (en la práctica las muestras tienen un espesor finito) con una geometría de microporo circular, siendo ésta generalmente desconocida o difícil de determinar.




(a) (b)

Figura 5 – Comparativa del coeficiente de absorción sonora medido (marcadores) y estimado analíticamente (líneas) para diferentes muestras de hormigón sin perforar y perforadas: (a) material 2 y (b) material 3.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado las propiedades físicas y acústicas de hormigón perforado elaborado a partir de agregados de arlita de distintos tipos y tamaños. Para ello, se ha preparado una serie de muestras a pequeña escala y se ha procedido a la realización de ensayos en tubo de onda plana para determinar su absorción sonora. Los resultados indican que este tipo de materiales ofrecen una absorción acústica relativamente alta y pueden considerarse una alternativa sostenible a otras soluciones comúnmente empleadas en aplicaciones prácticas. Adicionalmente, se han realizado predicciones de esta propiedad acústica tomando modelos teóricos cuyos parámetros de entrada pueden determinarse con ensayos experimentales básicos. La comparación de los resultados analíticos muestra una buena correlación con las medidas, lo cual confirma que los modelos considerados pueden utilizarse con éxito en el diseño de este tipo de hormigón perforado. No obstante, y aunque los resultados preliminares son prometedores de cara a su uso en las industrias de la construcción y las obras públicas, sería interesante evaluar otras propiedades y otras proporciones de mezcla.

## REFERENCIAS

[1] DB-HR (2007) Documento Básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación.

[2] Maa, D. Y. (1987) Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng. J.* **29** (3), 77-84.

[3] Beranek, L. L. y Vér, I. L. (1992) *Noise and vibration control engineering: Principles and applications*. John Wiley and Sons, Nueva York.

[4] Ingard, K. U. (1994) *Notes on sound absorption technology*. Noise control foundation, New York, Poughkeepsie.

[5] Atalla, N. y Sgard, F. (2007) Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *J. Sound Vib.* **303** (1-2), 195-208.

[6] Randeberg, R. T. (2000) Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design. Tesis doctoral, NTNU, Noruega.

[7] Sakagami, K., Nagayama, Y., Morimoto, M. y Yairi, M. (2009) Pilot study on wideband sound absorber obtained by combination of two different microperforated panel (MPP) absorbers. *Acoust. Sci. Technol.* **30** (2), 154-156.

[8] Tayong, R. (2013) On the holes interaction and heterogeneity distribution effects on the acoustic properties of air-cavity backed perforated plates. *Appl. Acoust.* **74** (12), 1492-1498.

[9] Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P. y Alba, J. (2015) A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects. *Appl. Acoust.* **90**, 1-8.

[10] Zwikker, C. y Kosten, C. W. (1949) *Sound absorbing materials*. Elsevier, Nueva York.

[11] Attenborough, K. (1983) Acoustic characteristics of rigid-fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.* **73** (3), 785-799.

[12] Johnson, D. L., Koplik, J. y Dashen, R. (1987) Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* **176** (1), 379-402.

[13] Horoshenkov, K. V. y Swift, M. J. (2001) The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am.* **110** (5), 2371-2378.

[14] Olny, X. y Boutin, C. (2003) Acoustic wave propagation in double porosity media. *J. Acoust. Soc. Amer.* **114** (1), 73-89.

[15] Auriault, J. L. y Boutin, C. (1994) Deformable media with double porosity – III: Acoustics. *Transp. Porous Media* **14** (2), 143-162.

[16] Sgard, F. C., Olny, X., Atalla, N. y Castel, F. (2005) On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Appl. Acoust.* **66** (6), 625-651.

[17] Bécot, F. X., Jaouen, L. y Gourdon, E. (2008) Applications of the dual porosity theory to irregularly shaped porous materials. *Acta Acust. United Ac.* **94** (5), 715-724.

[18] Dazel, O., F. X. Bécot y Jaouen, L. (2012) Biot effects for sound absorbing double porosity materials. *Acta Acust. United Ac.* **98** (4), 567-576.

[19] Doutres, O., Atalla, N. y Osman, H. (2015) Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions. *J. Acoust. Soc. Amer.* **137** (6), 3502-3513.

[20] Bonwetsch, T., Bärtschi, R., Kobel, D. Gramazio, F. y Kohler, M. (2007) Digitally fabricating tilted holes: experiences in tooling and teaching design. *Predicting the future, Proceedings of the 24th Annual Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*. Frankfurt, Alemania, 793-800.

[21] Kohler, M., Gramazio, F. y Willmann, J. (2014) *The robotic touch: how robots change architecture*. Park Books, Zurich.

[22] Horoshenkov, K. V., Hughes, D. C. y Cwirzen, A. (2003) The sound speed and attenuation in loose and consolidated granular formulations of high alumina cements. *Appl. Acoust.* **64** (2), 197-212.

[23] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L., Horoshenkov, K. V. y Khan, A. (2013) The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *J. Acoust. Soc. Am.* **134** (6), 4698-4709.

[24] Carbajo, J., Esquerdo-Lloret, T. V., Ramis, J., Nadal-Gisbert, A. V. y Denia, F. D. (Aceptado) Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Mater. Construcc.*

[25] ISO 10534-2: (1998) Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method.

[26] Vasina, M., Hughes, D. C., Horoshenkov, K. V. y Lapčík Jr, L. (2006) The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl. Acoust.* **67** (8), 787-796.

[27] Nelder, J. A. y Mead, R. (1965) A simplex method for function minimization. *Comput. J.* **7** (4), 308-313.

[28] Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H-C. y Cummings, A. (2005) Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Appl. Acoust.* **66** (6), 607-624.

[29] Ingard, K. U. y Dear, T. (1985) Measurement of acoustic flow resistance. *J. Sound Vib.* **103** (4), 567-572.

[30] Leclaire, P., Kelders, L., Lauriks, W., Melon, M. Brown, N. y Castagnède, B. (1996) Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air. *J. Appl. Phys.* **80** (4), 2009-2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DESARROLLO E INNOVACIÓN DE MEMBRANAS ACÚSTICAS PROYECTADAS IN SITU

PACS: 43.55.Ti

Espinel Valdivieso, Ana[1]; Ausejo Prieto, Miguel[1]; Sanz Mata, Ismael[2]
[1] AUDIOTEC Ingeniería Acústica, S.A.
C/ Juanelo Turriano, nº 4 - Parque Tecnológico de Boecillo - 47151 Boecillo (Valladolid), España
Tel: +34 983 361 326
E-mail: info@audiotec.es
[2] Desarrollos Químicos para la Construcción S.L.
C/ Curtidores N4. Polígono Industrial San Cosme II. 47620. Villanubla (Valladolid)
Tel: +34 647 680 283
Web: www.sonec.es
E-mail: info@sonec.es

**ABSTRACT**

The results and findings of the development and innovation project carried out between R&D company DQC (*Desarrollos Químicos para la Construcción*) together with the *Acoustics Technological Centre*, belonging to AUDIOTEC group, are presented in this paper.

The project objective was to improve the performance of the acoustic membrane for construction produced by DQC, and to increase their applicability in the building sector.

As a result, DQC have created new products with high acoustic performance including SONEC ACOUSTIC, the only acoustic membrane for in-situ projection which has been certified by an accredited and standardized tests in laboratory chambers; the SONEC DECK COVER for application on roofs and the SONEC TITANIUM designed to be used in facades.

**RESUMEN**

En el presente trabajo se presentan los resultados y conclusiones del proyecto de desarrollo e innovación de producto llevado a cabo entre el departamento de I+D+i de la empresa DQC (Desarrollos Químicos para la Construcción) y el Centro Tecnológico de Acústica del grupo AUDIOTEC.

El objetivo del proyecto ha sido mejorar las prestaciones de las membranas acústicas para la construcción que fabrica DQC, e innovar en su aplicabilidad en el sector. Como resultado se han creado nuevos productos con altas prestaciones acústicas, entre ellos el SONEC ACOUSTIC, la única membrana acústica proyectada IN SITU que cuenta con certificados realizados por una Laboratorio acreditado y con ensayos en cámaras normalizadas, el SONEC COVER DECK para su aplicación en cubiertas, y el SONEC TITANIUM para su aplicación en fachadas.

## 1.- INTRODUCCIÓN

El Centro Tecnológico de Acústica del grupo AUDIOTEC ha participado con el Departamento de I+D+i de la empresa DQC (Desarrollos Químicos para la Construcción) en el desarrollo e innovación de nuevos productos para soluciones de mejora acústica en el sector de la construcción.

Se ha trabajado sobre la base de los elastómeros que fabrica la empresa DQC con el objeto de crear a partir de ellos nuevos productos orientados a aplicaciones específicas tanto para edificios de nueva construcción como para rehabilitaciones.
Todos los nuevos productos se han creado de forma que puedan ser aplicados como membranas acústicas continuas, proporcionando por tanto una óptima estanqueidad en su aplicación además de las demás propiedades que aportan estos elastómetros (resistencia, durabilidad, permeabilidad al vapor de agua,…).

A continuación se presentan los nuevos productos resultantes de este proyecto, los cuales han sido ensayados y certificados mediante ensayos acústicos en las cámaras normalizadas con las que cuenta el Centro Tecnológico Acústico del Grupo AUDIOTEC en el Parque Tecnológico de Boecillo en Valladolid.

## 2.- PROCESO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE PRODUCTOS.

Partiendo de los elastómeros básicos que fabrica DQC, su departamento de Investigación y Desarrollo llevó a cabo reformulaciones en su composición con los siguientes objetivos consensuados con el Dpto. de I+D+i de AUDIOTEC:

- Que el producto final pudiera aplicarse mediante una máquina airless que facilitase su proyección continua sobre superficies.
- Que tuviera unas propiedades de impermeabilización, traspiración al vapor de agua, durabilidad y elasticidad adecuadas para poder ser aplicado en exteriores.
- Que pudiera reticular de una forma rápida una vez proyectado.
- Que tuviera propiedades adhesivas para poder fijar a él paneles de lanas minerales.
- Que pudiera ser de fácil aplicación entre placas de yeso laminado.
- Que se pudiera adherir a cualquier tipo de superficie.
- Que fuera ignífugo.

Una vez llevadas a cabo las nuevas formulaciones en la composición del producto, los Departamentos de Investigación y Desarrollo de DQC y AUDIOTEC estudiaron y definieron los sistemas constructivos en los que se podía aplicar cada uno de los productos desarrollados de forma que aportaran soluciones novedosas en el mercado con unas prestaciones de mejora acústica.

Finalmente, una vez definidos los sistemas constructivos en los que se emplearían los nuevos productos de DQC, se procedió a su caracterización acústica en las cámaras de ensayo normalizadas del Centro Tecnológico Acústico del Grupo AUDIOTEC en el Parque Tecnológico de Boecillo.

Estas cámaras de ensayo cumplen con los requisitos establecidos en las normas UNE EN ISO 10140 Partes 1 a 5, y su configuración como cámaras móviles permitió que se llevaran a cabo diversas construcciones de muestra y ensayos de forma simultánea, agilizándose el desarrollo del proyecto.



Fig. 1. Ejecución de muestras en bastidores y cámaras de ensayo

Finalmente se identificaron los nuevos productos SONEC ACOUSTIC, SONEC COVER DECK y SONEC TITANIUM junto con las aplicaciones de cada uno de ellos, llevándose a cabo una aplicación práctica en casos reales para determinar sus prestaciones “in situ”.

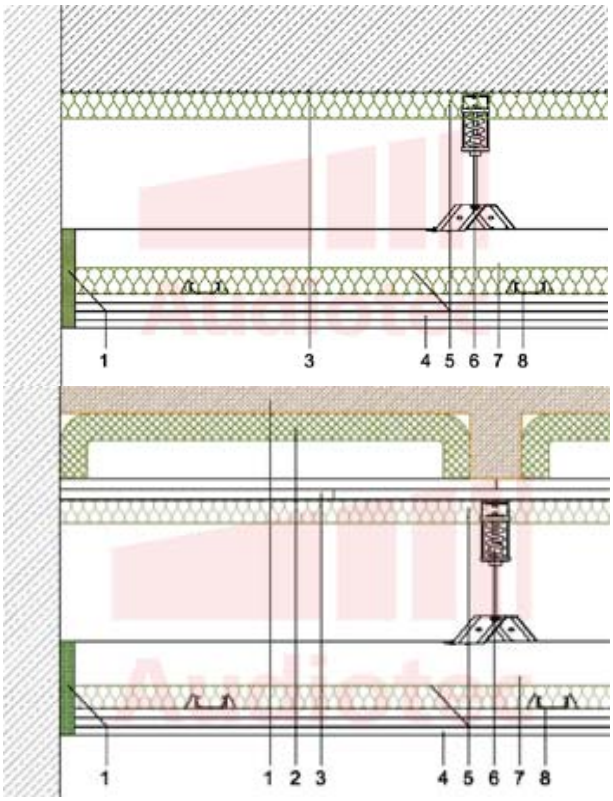
## 3.- SONEC ACOUSTIC. Aplicación en aislamientos acústicos de locales en los que se requieren elevados aislamientos acústicos.

En los locales en los que se generan elevados niveles sonoros, se hace indispensable la utilización de soluciones constructivas con unas elevadas prestaciones acústicas con el objeto de que el desarrollo de su actividad no cause molestias a los vecinos. A continuación se presentan dos casos prácticos en los que se han aplicado sistemas constructivos innovadores en base a placas de yeso laminado y membrana acústica SONEC ACOUSTIC:

***CASO PRÁCTICO 1.***
**Uso: Bar Musical**
**Problemática:**
Forjado antiguo muy débil, formado por viguetas in situ y con poco espesor
**Solución:**
4 placas PYL de 13mm de espesor
Amortiguación al límite
Proyección de Membrana acústica Sonec Acoustic entre placas

***CASO PRÁCTICO 2.***

**Estructura de Madera**
**Uso: Restaurante**
**Problemática:**
Bajo aislamiento acústico de partida.
Baja Protección al fuego
**Solución:**
Refuerzo de estructura de madera.
3 placas PYL de 13mm de espesor
Amortiguación al límite
Proyección de Membrana acústica Sonec Acoustic entre placas




MEJORA ACÚSTICA OBTENIDA



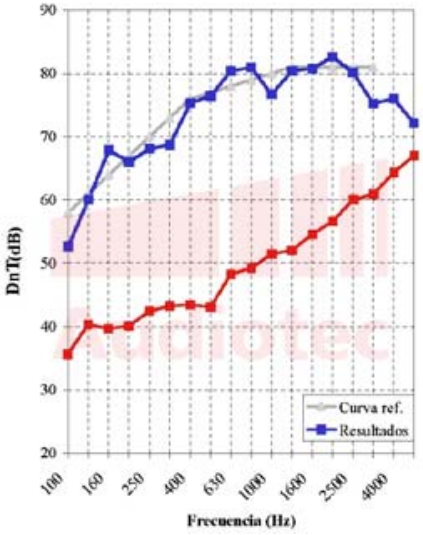




Fig. 2 Mejora acústica obtenida tras la aplicación de un sistema son SONEC ACOUSTIC

## 4.- SONEC ACOUSTIC. Aplicación en sistemas constructivos tradicionales.

En esta línea se ha investigado sobre la mejora que supone el aplicar a sistemas acústicos tradicionales una proyección de material elastómero, tipo Sonec Acoustic , que elimina las fisuraciones y evita los puentes acústicos debidos a un mal solape de las láminas.

Esta membrana incrementa la masa del conjunto, mejora la elasticidad dinámica y disminuye la frecuencia de resonancia del sistema por debajo de rango audible. Este producto también se tiene aplicación como solución acústica para Actividades Clasificadas y Salas de Máquinas, debido a su buen comportamiento en bajas frecuencias.

Se comprobó la facilidad práctica de ejecución, mediante su aplicación de forma continua con una máquina airless, así como sus cualidades En estos años de aplicación práctica de estas membranas acústicas continuas en nuestras obras, también se ha constatado su facilidad de ejecución, la ayuda que proporciona para la fijación de otros materiales gracias a sus excepcionales cualidades adherentes, y su elevada elasticidad que le permite absorber dilataciones y contracciones en los paramentos originales y su comportamiento al fuego(Bs2d0) hace de esta membrana la solución idónea para el aislamiento de actividades clasificadas .



Fig. 3. Aplicación del SONEC ACOUSTIC formando una membrana continua

Ventajas acústicas

- Mejora acústica, sin apenas incremento del espesor de la solución constructiva, entre 3 y 5 dB.
- Eliminación de la caída del aislamiento en la frecuencia crítica de 2500 Hz de sistemas de PYL.
- Aumenta el aislamiento acústico en bajas frecuencias al transformar la energía acústica en dinámica.
- Desplaza la frecuencia de resonancia del sistema constructivo a frecuencias menos audibles.

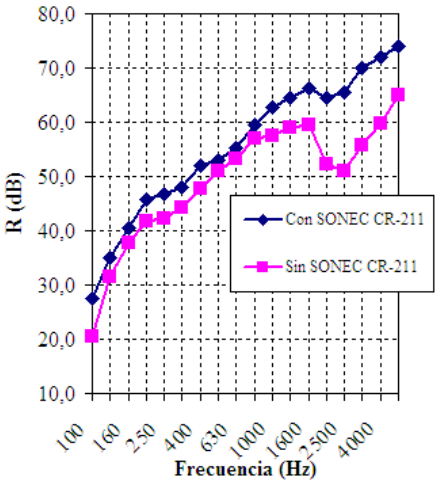



Fig. 4. Mejora acústica tras aplicar SONEC ACOUSTIC entre PYL.

**5.- SONEC COVER DECK. Aplicación en cubiertas, en especial las que contienen materiales nocivos como el amianto.**

Tradicionalmente, en la impermeabilización de cubiertas se emplean productos que contienen disolventes. Con el desarrollo del elastómero de aplicación continua SONEC COVER DECK se ha conseguido que la impermeabilización de cubiertas sea más segura por el sistema de fraguado de la solución aplicada . La reticulación del producto es física , por eliminación del agua que contiene en su formulación aproximadamente 1,2% del total y gracias a su elevada elongación(superior al 450%) no fisura con los movimientos y contracciones de los soportes . Avalado por certificados, su resistencia a los rayos ultravioletas es superior a los 25 años .
Cover Deck es un producto especialmente diseñado para el encapsulado de cubiertas con Amianto, con una proyección por el exterior y otra por el interior logrando encapsular completamente la cubierta, y evitando la propagación de partículas cancerígenas.
Además, en ensayos realizados se ha conseguido reducir la transmisión de ruidos de impacto sobre la cubierta (lluvia, etc…) entre 3 y 5 dBA en función del tipo de cubierta ligera sobre la que se aplique, logrando bajar la frecuencia de resonancia en las cubiertas de chapa metálica.

Esta solución tiene las siguientes ventajas:

- Rapidez en la ejecución (un operario puede aplicar más de 700 m2/día)
- Abarata costes en la impermeabilización, evita la retirada de la cubierta de amianto
- No fisura ni craquela , gracias a su elevada elongación
- Resistencia a los rayos ultravioletas y a los fenómenos meteorológicos

**6.- SONEC TITANIUM. Aplicación en fachadas.**

Gracias a la innovación y al trabajo conjunto con otras empresas, se han conseguido desarrollar sistemas constructivos en los que el producto SONEC TITANIUM contribuye a mejorar la eficiencia energética de las envolventes, logrando reducir las pérdidas de calor y mejorar el aislamiento acústico, reduciendo los niveles de ruido en el interior de las viviendas .
Por sus cualidades adherentes, se adapta a cualquier superficie y por su elevada elasticidad previene la aparición de fisuras y grietas .
Evita la aparición de humedades y condensaciones gracias a su permeabilidad al vapor de agua. Con Sonec Titanium " LA VIVIENDA RESPIRA ".
La proyección del elastómero sobre la superficie de un material crea una capa continua que aumenta su resistencia estructural frente a golpes e impactos.
Este producto puede aplicarse tanto para cámaras interiores de fachadas, como en fachadas ventiladas, en combinación con lanas minerales y gracias a sus nuevas propiedades para utilización en exteriores.

Estas soluciones tienen las siguientes ventajas:

- Rapidez en la ejecución (más de 500 m2/día)
- Abarata costes en la ejecución
- No fisura ni craquela , permite el pegado de otros materiales de construcción
- Mejora la eficiencia energética y acústica de la envolvente

## 7.- CONCLUSIONES

- Para la puesta en el mercado de una nueva solución acústica es necesario previamente el desarrollo de un adecuado proceso de diseño, análisis, ensayo y validación en obra de dichas soluciones.
- La innovación no sólo consiste en “inventar” materiales nuevos, sino también en desarrollar nuevos sistemas constructivos empleando una adecuada combinación de materiales ya existentes en el mercado. Para ello es fundamental la experiencia práctica y su validación técnica tanto en cámaras normalizadas como en casos prácticos “in situ”.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LA VERIFICACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS EN LA ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS DE ENSAYOS ACÚSTICOS

**PACS: 43.58.-e**

Pedrero González, Antonio[1]; Sánchez Bote[2], José Luis; Díaz Sanchidrián[1], César; Navacerrada Saturio, María de los Ángeles[1].
[1]Grupo de investigación en acústica arquitectónica
[2] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid
Tel: +34 913 364 249
Fax: +34 913 366 554
E-mail: arquilav.arquitectura@upm.es

## ABSTRACT

UNE-EN ISO / IEC 17025 establishes the general requirements for the competence of testing and calibration laboratories, and serves as a reference for the accreditation bodies. One of the requirements stated in this standard is to ensure that the equipment used in the measurements meet the specifications that determine the corresponding measurement methods.
In this paper the requirements to sound sources in the usual acoustic tests are analyzed. Verification techniques commonly used are described and the most common errors in the verification and evaluation of results are discussed.

## RESUMEN

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025 establece los requisitos generales para la competencia en la realización de ensayos y sirve de referencia para la acreditación de los laboratorios. Entre los requisitos que establece está el de asegurar que los equipos utilizados en las mediciones cumplen con las especificaciones que determinan las normas de ensayo correspondientes.
En este trabajo se analizan los requisitos que se imponen a las fuentes sonoras en los ensayos acústicos más usuales. Se describen las técnicas de verificación habitualmente utilizadas y se discuten los errores más comunes en las verificaciones y en la evaluación de los resultados.

## INTRODUCCIÓN

La acreditación de los laboratorios de ensayo se rige por los criterios enunciados en la norma internacional ISO/IEC 17025 [1], la cual especifica los requisitos que deben cumplirse, tanto de orden técnico como de gestión, para garantizar la competencia técnica de dichos laboratorios.

Con respecto a los equipos de ensayo, la norma establece que, antes de ponerse en servicio, se debe constatar que estos cumplen con las especificaciones requeridas en las normas de ensayo correspondientes. La evaluación del cumplimiento de los requisitos normativos de los

equipos puede realizarse mediante la calibración de los mismos, cuando la especificación es una magnitud susceptible de ser calibrada, o mediante una verificación, en el resto de los casos.

Calibración y verificación son procesos distintos que a menudo se confunden. La *calibración* es un conjunto de operaciones por medio de las cuales se establece una relación entre los valores de una magnitud indicados por un equipo de medida y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones. En general, la calibración compara la lectura de un aparato de medida con la obtenida con otro equipo, de mayor precisión y con trazabilidad metrológica documentada, para el mismo valor de la magnitud a medir.

Según el Vocabulario Internacional de Metrología [2], se define *verificación* como la "aportación de evidencia objetiva de que un elemento satisface los requisitos especificados". Aunque en la mayoría de los casos la verificación se basa en algún tipo de medición, en ocasiones esta se puede efectuar a partir de revisiones, inspecciones, comprobaciones, o cualquier otra acción que establezca y documente que los equipos cumplen con los requisitos especificados.

Cuando las características de los equipos puedan variar con el tiempo y/o con el uso, es necesario establecer un plan de calibraciones/verificaciones periódicas con una frecuencia que garantice que, en condiciones normales, dichas características se mantienen dentro de las especificaciones entre calibraciones o verificaciones sucesivas.

Dado que toda medición lleva asociada una incertidumbre, las declaraciones de conformidad realizadas a partir de resultados de medida, es decir, las efectuadas a partir de calibraciones o a partir de verificaciones basadas en mediciones, deberían tener en cuenta la incertidumbre correspondiente. Si denominamos *zona de especificación* al margen de tolerancia permitido para una determinada especificación, para poder asegurar el cumplimiento de dicha especificación, el resultado numérico de la medición debe estar contenido en el intervalo denominado *zona de cumplimiento*. La zona de cumplimiento es la zona de especificación reducida en una cantidad igual a la incertidumbre expandida de medida en cada uno de los límites que definen la tolerancia. Esto se ilustra en la Figura 1.

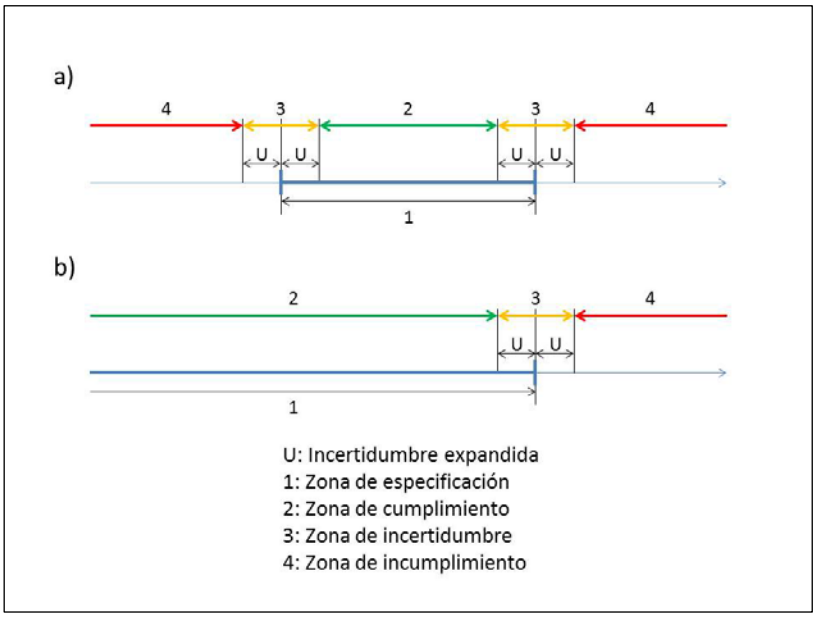



Figura 1. Directrices para la declaración de cumplimiento de especificaciones considerando la incertidumbre de medida/calibración: a) especificación con dos límites; b) especificación con un solo límite.

En numerosos ensayos acústicos es necesario emitir señales de prueba pare excitar acústicamente el campo sonoro en el que se efectúa el ensayo. Las magnitudes a determinar en los ensayos se obtienen de la medición de la respuesta de dichos campos sonoros al estímulo acústico aplicado. La emisión de las señales de prueba se realiza mediante lo que denominamos fuentes sonoras.

Los requerimientos que se establecen a las fuentes sonoras utilizadas en los ensayos acústicos son diferentes según el tipo de ensayo que se vaya a realizar. En la mayoría de los casos las magnitudes en las que se expresan las especificaciones no son susceptibles de calibración, por lo que la comprobación del cumplimiento de dichas especificaciones debe realizarse a partir de una verificación.

En este trabajo se analizan dos de las verificaciones más habituales que se requieren a las fuentes sonoras que se utilizan en los ensayos acústicos: la verificación de la omnidireccionalidad, requerida en ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales y en ensayos de tiempo de reverberación, y la verificación de la cobertura sonora, requerida en medidas de aislamiento acústico de fachadas y elementos de fachadas.

## VERIFICACIÓN DE LA OMNIDIRECCIONALIDAD

En diversos tipos de ensayos acústicos se requiere una emisión sonora lo más omnidireccional posible. Tal es el caso de los ensayos de tiempo de reverberación según las normas UNE-EN ISO 3382, partes 1, 2 y 3; de los ensayos de aislamiento acústico de locales, tanto en laboratorio, según UNE-EN ISO 10140, como *in situ*, según EN ISO 10052, UNE EN ISO 140-4, recientemente derogada, o UNE-EN ISO 16283-1, que sustituye a la anterior; o de los ensayos de absorción sonora en cámara reverberante según UNE-EN ISO 354. En algunos casos las normas no establecen unos criterios cuantitativos que deban cumplirse sino que se limitan a decir que la fuente sonora debe ser tan omnidireccional como sea posible. En el resto de casos el procedimiento de verificación es similar; la única variación entre unas normas y otras es la amplitud de la zona de especificación.

La explicación del proceso para la verificación es confusa en algunas normas (sobre todo en las más antiguas) lo que ha propiciado, en ocasiones, interpretaciones incorrectas. El procedimiento se explica a continuación.

La verificación debe realizarse en campo libre. En acústica entendemos por campo libre una región del espacio en la cual las ondas sonoras se propagan sin ninguna perturbación, lo que implica que no debe haber ninguna superficie reflectante (incluido el suelo) en las cercanías de los elementos de ensayo. La verificación, por tanto, se debería realizar en cámara anecoica o en exteriores, a una distancia del suelo suficientemente grande como para que la reflexión que este produce tenga, en la posición de medida, una energía despreciable comparada con la que se propaga por el camino directo desde el emisor.

La fuente sonora se debe hacer rotar, mediante una mesa giratoria, con una velocidad de giro constante y suficientemente baja como para garantizar un tiempo de integración adecuado en todas las bandas de frecuencia. El micrófono se sitúa en el plano perpendicular al eje de giro, a la altura del centro de la fuente sonora, y a una distancia que evite el campo próximo de la misma (la normativa propone1,5 m). Se emite un ruido de banda ancha que cubra el margen de frecuencias de interés. El nivel emitido debe ser tal que la contribución del ruido de fondo en las mediciones sea despreciable.

Se debe medir, para cada banda de frecuencia, el promedio energético del nivel de presión sonora obtenido en un giro completo, $L_{360º}$, y el promedio energético del nivel de presión sonora en todos y cada uno de los “ángulos deslizantes” de 30º producidos en dicho giro, $L_{30,i}$. Se entiende por “ángulo deslizante” una rotación de 30º de la fuente sonora. Cada ángulo

deslizante está desplazado un intervalo de ángulo Δø con respecto al anterior, donde este Δø se suele elegir entre 1º y 5º (ver Figura 2). Si se elige un intervalo de ángulo de 1º, el número de ángulos deslizantes a considerar es 360, mientras que si se elige un intervalo de ángulo de 5º este número se reduce a 72.

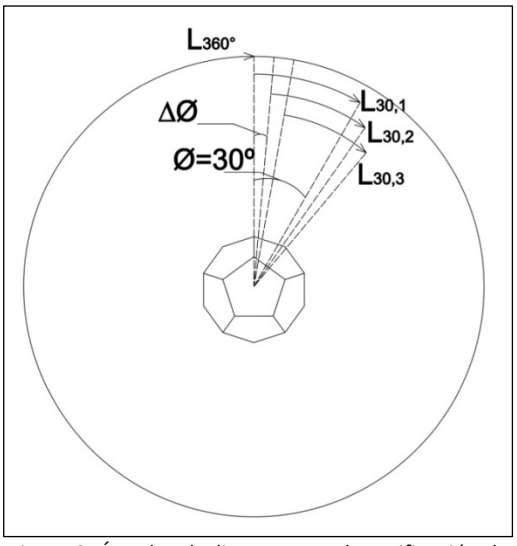



Figura 2. Ángulos deslizantes para la verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras.

El requerimiento se expresa en términos del Índice de Directividad, *DI*, para cada ángulo deslizante, definido como

$$DI_i = L_{360^o} - L_{30,i} \quad (1)$$

Las tolerancias permitidas dependen de la norma de ensayo. En el caso de las normas de medida del aislamiento acústico las tolerancias se definen en bandas de tercio de octava y sus valores son los mismos, tanto para las normas de ensayo *in situ* como para las normas de medida en laboratorio. Las tolerancias de las normas de medida del tiempo de reverberación se definen en bandas de 1/1 octava (independientemente de que en las mediciones se empleen filtros de 1/1 octava o de 1/3 de octava) [3], y son más estrechas que las establecidas en las normas de medida del aislamiento acústico. La Tabla 1 muestra los valores máximos permitidos de *DI* en cada una de las normas de ensayo.

La verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras, tal y como se ha enunciado hasta ahora, requiere disponer de una cámara anecoica y de una mesa giratoria para rotar la fuente sonora durante las mediciones. En caso de no disponer de estos elementos, se puede efectuar una verificación eficaz utilizando posiciones discretas de medida alrededor de la fuente sonora como alternativa al giro continuo de la misma y sustituyendo la cámara anecoica por un entorno de campo libre sobre un plano reflectante.

Se puede tener una aproximación razonable al promedio de la energía sonora en un ángulo deslizante de 30º promediando los niveles de presión sonora en una serie de posiciones discretas distribuidas a lo largo de un arco de circunferencia correspondiente a un ángulo central de 30º de amplitud, con tal de que los puntos de medida estén suficientemente juntos. La normativa nos propone realizar mediciones en puntos discretos a intervalos de 5º, lo que supone 72 puntos de medición. El valor de $L_{360^o}$ en cada banda de frecuencia se calcula como el promedio del nivel de presión sonora en las 72 posiciones de medida. El promedio energético en cada uno de los ángulos deslizantes de 30º, $L_{30,i}$, se calcula promediando los niveles de presión sonora obtenidos en las seis posiciones contiguas de micrófono que configuran un ángulo de 30º, tres posiciones a cada lado su bisectriz. Por ejemplo, si numeramos del 1 al 72 las posiciones de medida, el valor del nivel de presión sonora para el primer ángulo deslizante se obtendría promediando los niveles de los

| Frecuencia | $DI_{max}$ | |
|---|---|---|
| | ISO 10140-5<br>ISO 16283-1<br>ISO 140-4 | ISO 3382-1<br>ISO 3382-2 |
| 100 | ± 2 dB | ± 1 dB |
| **125** | ± 2 dB | |
| 160 | ± 2 dB | |
| 200 | ± 2 dB | ± 1 dB |
| **250** | ± 2 dB | |
| 315 | ± 2 dB | |
| 400 | ± 2 dB | ± 1 dB |
| **500** | ± 2 dB | |
| 630 | ± 2 dB | |
| 800 | ± 5 dB | ± 3 dB |
| **1000** | ± 8 dB | |
| 1250 | ± 8 dB | |
| 1600 | ± 8 dB | ± 5 dB |
| **2000** | ± 8 dB | |
| 2500 | ± 8 dB | |
| 3150 | ± 8 dB | ± 6 dB |
| **4000** | ± 8 dB | |
| 5000 | ± 8 dB | |

Tabla 1. Valores máximos permitidos de los índices de directividad para garantizar una radiación omnidireccional de la fuente sonora.

puntos 70, 71, 72, 1, 2 y 3; los del segundo ángulo deslizante serían los puntos 71, 72, 1, 2, 3 y 4, y así sucesivamente hasta completar los 72 ángulos deslizantes necesarios.

Con respecto al entorno de medida, la cámara anecoica puede ser sustituida por un campo libre sobre suelo reflectante, como el que se obtiene en exteriores cuando se está suficientemente alejado de paredes o cualquier superficie reflectante que no sea el suelo. El efecto de la reflexión del sonido en el suelo se tratará con mayor detalle en los apartados siguientes. Solamente mencionar que si el suelo es homogéneo y uniforme en toda la zona de ensayo, la perturbación que producirá dicha reflexión para cada banda de frecuencia será igual en todos los puntos de medida. Por regla general, es más fácil obtener unas condiciones favorables de homogeneidad en suelos duros, como por ejemplo suelos asfaltados que en suelos blandos, como pueden ser suelos de tierra o suelos con vegetación.

Dado que los altavoces pueden deteriorarse con el uso, es conveniente diseñar un plan de verificaciones periódicas. De acuerdo con la normativa vigente, el periodo entre verificaciones no debe exceder los dos años.

## VERIFICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO PARA ENSAYOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO DE FACHADAS

Los ensayos de aislamiento acústico de fachadas y elementos de fachada requieren un recubrimiento sonoro uniforme de la superficie de la fachada o el elemento a ensayar. De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 140-5 [4], la directividad del altavoz debe asegurar que las diferencias del nivel de presión sonora entre dos puntos cualesquiera de la superficie de la muestra, en todas las bandas de frecuencia de interés, sean inferiores a 5 dB, medidas en campo libre sobre una superficie del mismo tamaño y orientación que la pared o elemento a ensayar. También apunta que si se aplica a muestras de gran superficie, se pueden aceptar diferencias de hasta 10 dB.

La verificación de este requisito, tal y como está enunciado, plantea varios problemas. En primer lugar, el tamaño de la muestra puede ser diferente en cada ensayo, y la orientación de la fuente sonora con respecto a la fachada depende de la altura del centro de la misma o la del elemento de fachada objeto de ensayo. La interpretación literal del texto de la norma implica que sería necesaria una verificación específica de la cobertura sonora para cada ensayo, atendiendo a las características geométricas de los elementos implicados, lo que incrementaría significativamente los costes de la medición. Lo habitual es evaluar cuál es la superficie recubierta con una dispersión de 5 dB y 10 dB en la orientación en la que el recubrimiento es más desfavorable, y para la mínima distancia permitida entre la fachada y la fuente sonora. Para cualquier otra distancia y/o orientación la superficie correctamente recubierta será mayor.

Otro problema radica en el entorno de ensayo. La norma establece que la medición hay que realizarla en campo libre, es decir en cámara anecoica. Sin embargo las dimensiones de los elementos y las distancias mínimas que hay que respetar hacen que la mayoría de las cámaras anecoicas existentes no sean suficientemente grandes para realizar las mediciones necesarias. Esto se puede solventar de diferentes formas. Una de ellas es realizar las mediciones en la cámara anecoica utilizando una geometría reducida, y extrapolar, mediante cálculos, los valores obtenidos a la geometría real. Otra posibilidad es medir, también en una cámara anecoica, la directividad de la fuente sonora. A partir de esta directividad se puede calcular la radiación sonora de la misma para cualquier superficie, sea cual sea su tamaño y orientación [5]. La Figura 3 muestra un diagrama de directividad y la distribución de niveles calculada en una superficie a partir de dicha directividad, para unas condiciones de distancia y orientación dadas.

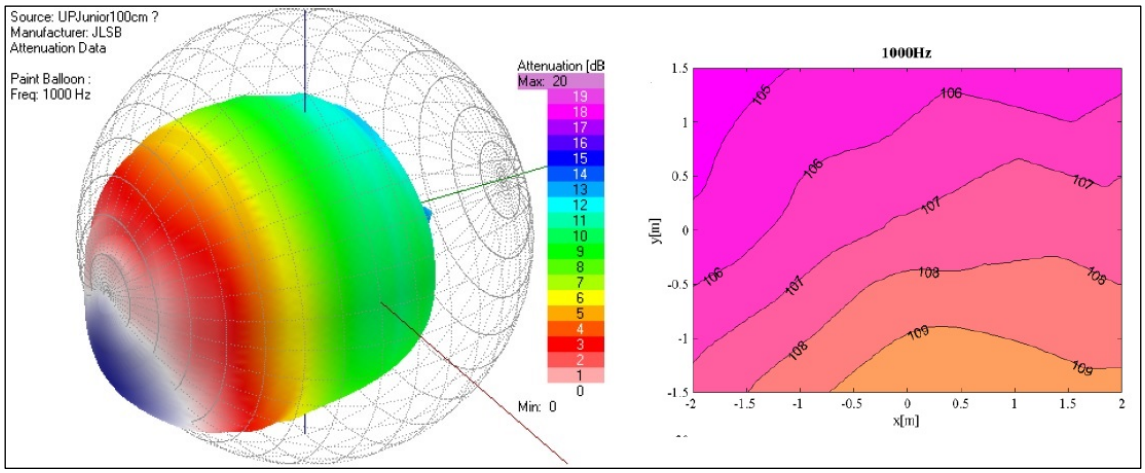



Figura 3. Directividad de una fuente sonora para la banda de 1 kHz y distribución del nivel de presión sonora sobre una superficie de 3x4 m, a una distancia d= 5 m, para la orientación más desfavorable.

Si no se dispone de una cámara anecoica, se puede intentar realizar la verificación en el exterior, en un lugar separado de superficies reflectantes. La verificación consistiría en emitir un ruido de banda ancha y medir los niveles de presión sonora que se obtienen en una rejilla de puntos distribuidos a lo largo de una superficie hipotética que representa la fachada. El problema con el que nos encontramos es que la reflexión del suelo afecta de una manera significativa a la señal que se capta en cada uno de los puntos de medida.

Debido a que el centro acústico de la fuente sonora se encuentra a una determinada altura del suelo, *a*, a cada posición de medida le llegan dos señales sonoras: la señal directa y la señal procedente de la reflexión del suelo. La segunda llega al receptor con un retardo $\tau$, correspondiente a la diferencia de caminos entre ambas señales sonoras (Figura 4).

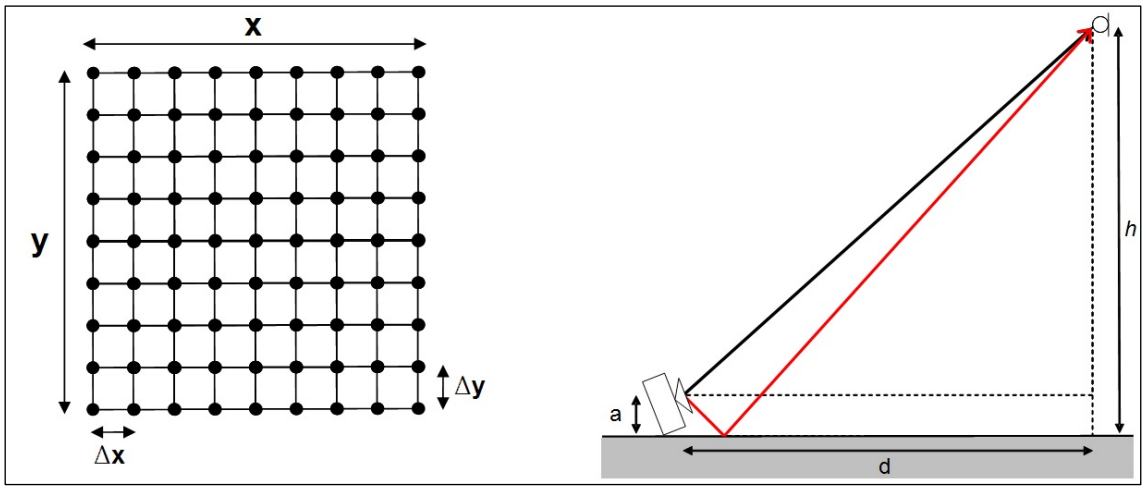



Figura 4. Rejilla de medida y diagrama de las señales sonoras que llegan a una posición de micrófono.

La combinación de la señal directa y la señal reflejada genera, en el punto de medida, un efecto denominado *filtro peine* que consiste en una alteración del espectro de la señal acústica caracterizada por una serie de máximos y mínimos en la respuesta en frecuencia de la señal recibida (Figura 5). La separación en frecuencia entre dos máximos o mínimos consecutivos depende del retardo entre ambas señales, mientras que las diferencias de nivel entre los "picos" y los "valles" dependen de la atenuación de la señal reflejada con respecto a la señal directa, estando esta atenuación condicionada por la divergencia esférica y por la absorción que se produce en la reflexión, que depende del coeficiente de absorción, α, del suelo.

Los mínimos se presentan en las frecuencias que cumplen la siguiente relación:

$$f_k = \frac{2k+1}{2\tau} \quad k = 0, 1, 2, \ldots, n \qquad (2)$$

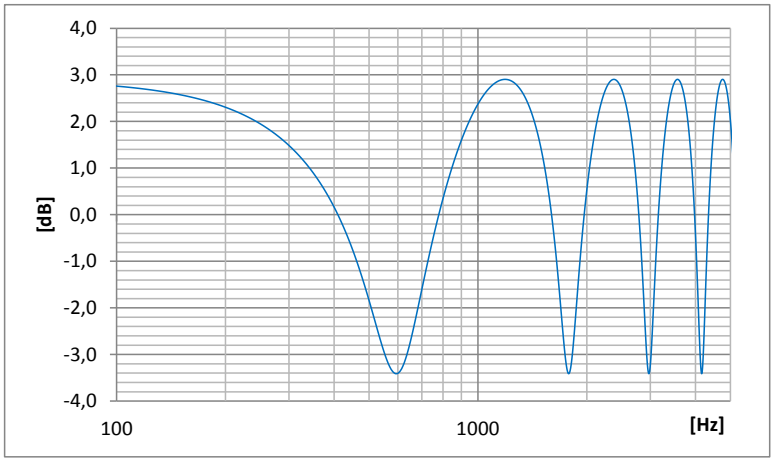



Figura 5. Ejemplo de filtro peine.

Los retardos y atenuaciones entre ambas señales son diferentes para cada uno de los puntos de la rejilla, lo que hace que las frecuencias de los máximos y los mínimos, así como las diferencias de nivel entre ambos, sean distintas en cada punto de medida. La Figura 6 muestra los filtros peine calculados para tres puntos con diferentes alturas. Se observa cómo las diferencias de nivel entre los distintos puntos, debidas solamente a la reflexión del suelo, para una determinada frecuencia pueden ser del mismo orden de magnitud, o incluso superiores a la tolerancia establecida por la norma de ensayo.

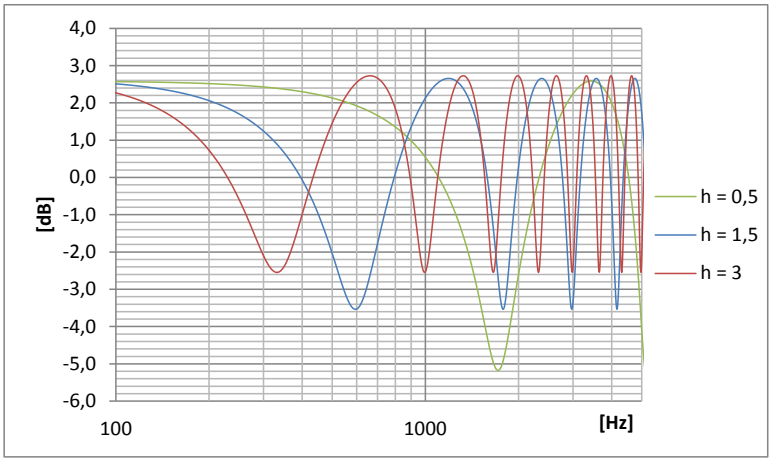



Figura 6. Filtros peine calculados para tres alturas diferentes. Los parámetros de cálculo utilizados son a=0,5 m, d=5 m y α =0,2.

Teniendo en cuenta que en las mediciones de verificación se combinarán los efectos de la directividad de la fuente sonora (que son los que tratamos de investigar) con los de la reflexión del suelo, es conveniente minimizar en lo posible estos últimos. Como se ha comentado anteriormente, las variaciones de nivel encontradas en el filtro peine dependen de la atenuación de la señal reflejada con respecto a la señal directa. Dicha atenuación será superior cuanto más absorbente sea el suelo sobre el que se realiza el ensayo. La Figura 7 presenta los filtros peine calculados para un punto determinado, considerando diferentes coeficientes de absorción del suelo (α=0,1, α=0,5 y α=0,8). Se puede apreciar que, en este ejemplo, mientras las diferencias de nivel entre bandas de frecuencia para α=0.1 (asimilable a un suelo rígido y

liso) superan los 6 dB, cuando el coeficiente de absorción del suelo es alto (α=0,8) estas diferencias se mantienen por debajo de 2 dB.

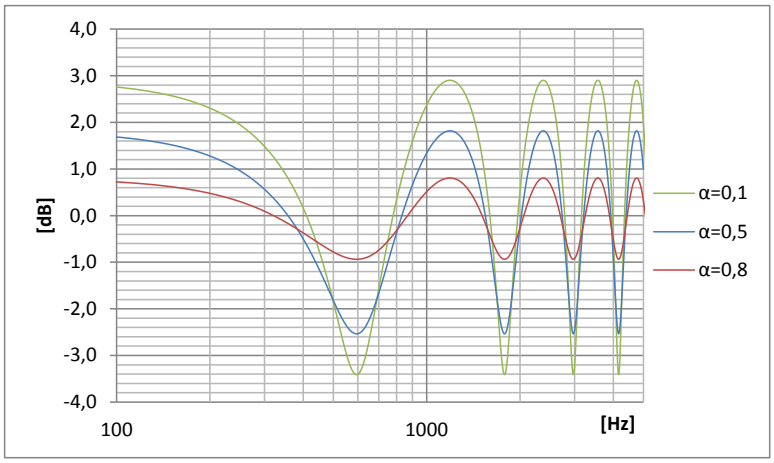



Figura 7. Efecto de la absorción del suelo en el espectro de la señal recibida en una posición de medida. Los parámetros de cálculo utilizados son h=1,5 m, a=0,5 m y d=5 m.

## CONCLUSIONES

Se han revisado los procedimientos de verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras y del recubrimiento sonoro de la muestra de ensayo. Ambas verificaciones deberían realizarse en condiciones de campo libre; no obstante se incluyen procedimientos alternativos de verificación que, si se controlan las condiciones del ensayo, pueden arrojar resultados satisfactorios.

## REFERENCIAS

[1] ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,* Genève: International Organization for Standardization, 2005.

[2] *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms,* Paris: Bureau International des Poids et Mesures; , 2012.

[3] ISO 3382-1:2009, *Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces,* Genève: International Organization for Standardization, 2009.

[4] ISO 140-5:1998, *Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades,* Genève: International Organization for Standardization, 1998.

[5] J. L. Sánchez Bote, A. Pedrero González y J. J. Gómez Alfageme, «Procedure for verification of sound source coverage over façades according to the International Standard ISO 140–5,» *Applied Acoustics,* vol. 73, nº 9, pp. 977-985, 2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# MÉTODOS DE EVALUACIÓN POR EL PROVEEDOR DE LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS DE UN EJERCICIO DE INTERCOMPARACIÓN ACÚSTICA

PACS: 43.15.+s

Espinel Valdivieso, Ana[1]; Arenaz Gombau, Ángel[1]; Ausejo Prieto, Miguel[1]; Gómez García, Sonsoles[2]
[1] AUDIOTEC Ingeniería Acústica, S.A.
C/ Juanelo Turriano, nº 4 - Parque Tecnológico de Boecillo - 47151 Boecillo (Valladolid), España
Tel: +34 983 361 326, E-mail: info@audiotec.es
[2] Asociación Española para la Calidad Acústica (AECOR)
C/ Tambre, nº 21, 2º - 28002 Madrid (Madrid), España
Tel: +34 915 541 421, Fax: +34 915 546 796, E-mail: info@aecor.es

## ABSTRACT

UNE EN ISO/IEC 17043:2010 specifies general requirements for the competence of providers of proficiency testing schemes and for de development and operation of proficiency testing schemes, dedicating a specific section to data analysis and evaluation of proficiency testing scheme results. In this work we will present the method used by the provider for the evaluation of acoustics proficiency testing scheme results by meeting the quality requirements of the standard.

## RESUMEN

La norma UNE EN ISO 17043 especifica los requisitos generales para la competencia de los proveedores de ensayos de intercomparación y para el desarrollo y operación de ensayos de intercomparación, dedicando un apartado específico al análisis de datos y a la evaluación de los resultados de los ensayos de aptitud. En este trabajo, se va a tratar la sistemática empleada por el proveedor para la evaluación de la calidad de los resultados en un ejercicio de intercomparación en acústica cumpliendo los requisitos de calidad establecidos en la norma de aplicación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La norma UNE EN ISO/IEC 17043 especifica los requisitos generales para la competencia de los proveedores de ensayos de intercomparación y para el desarrollo y operación de ensayos de intercomparación, dividiéndolos en requisitos técnicos y requisitos de gestión, dedicando un apartado específico al análisis de datos y a la evaluación de los resultados de los ensayos de aptitud [1].

La Asociación Española para la Calidad Acústica (AECOR) y la empresa Audiotec trabajan conjuntamente desde hace diez años en la promoción, organización y el correcto desarrollo de ejercicios de intercomparación de laboratorios de acústica, tanto en materia ambiental como en edificación, habiendo promovido desde entonces nueve ejercicios de intercomparación en los que se han inscrito más de 200 participantes, habiéndose consolidado como el proveedor líder y de referencia a nivel nacional en el campo de la acústica.

En este trabajo, se va a tratar la sistemática empleada por el proveedor para la evaluación de la calidad de los resultados en un ejercicio de intercomparación en acústica. Como se verá más adelante, es imprescindible que previamente al análisis de los resultados, el proveedor garantice que el desarrollo de la intercomparación se haya llevado de forma adecuada y cumpliendo los requisitos de calidad establecidos en la norma antes mencionada.

## 2. CONTROL DE CALIDAD DEL DESARROLLO DEL EJERCICIO DE INTERCOMPARACIÓN PREVIO A LA EVALUCIÓN DE LOS RESULTADOS

Durante el desarrollo del ejercicio de intercomparación acústica, todos los laboratorios participantes acuden a las mismas instalaciones a realizar sus ensayos sobre el mismo ítem. Con el fin de asegurar que los ítems bajo ensayo permanecen inalterables durante el desarrollo del programa, el proveedor debe realizar periódicamente controles de estabilidad y homogeneidad, asegurando así que se mantienen las condiciones iniciales de los ítems e instalaciones para todos los laboratorios.

El proveedor, además, debe elaborar un protocolo específico para cada tipo de ensayo que indique una serie de pautas a seguir por los participantes con el fin ayudarles en la correcta ejecución del ejercicio y de minimizar los errores más comunes que puedan cometer durante su participación en la intercomparación. Estos errores comunes que cometen los participantes son los siguientes:

- No seguir las instrucciones del organizador
- No realizar el ensayo de forma habitual sino como un ítem especial
- Modificar las indicaciones del protocolo con el fin de realizar el ensayo en condiciones más favorables
- No respetar las condiciones de repetibilidad, mezclando metodologías, personal, equipos, etc.
- Realizar un mayor número de medidas del requerido por el organizador o el método de medida, seleccionándolas o promediándolas en virtud de los resultados obtenidos.
- Cometer errores en la transcripción de resultados.
- Comentar resultados con otros participantes del ejercicio
- Presentar como propios resultados de medidas subcontratadas a otros laboratorios

Para que el desarrollo de un ejercicio de intercomparación se considere que ha tenido la calidad mínima requerida, el proveedor debe asegurar y comprobar que:

- La organización ha sido adecuada y se han suministrado las instrucciones precisas y adecuadas para ayudar a los laboratorios en la correcta realización del ejercicio.

- Se ha dispuesto de ítems de ensayo e infraestructuras adecuadas para la realización de cada tipo de ensayo objeto de intercomparación, y que éstas han permanecido inalterables y estables en el tiempo durante todo el desarrollo del programa, habiéndose realizado controles periódicos de estabilidad y homogeneidad.
- No se han observado por parte del técnico de logística circunstancias que pudieran haber puesto en compromiso el que los laboratorios contaran con las mismas condiciones de ensayo.
- El número de laboratorios participantes y repeticiones ha sido adecuado.
- Los laboratorios han realizado los ensayos con equipos de ensayo calibrados y cumpliendo los requisitos normativos exigidos.
- Los laboratorios participantes han enviado los datos correctamente en los formatos elaborados por el proveedor y en los plazos acordados.
- Se pueda considerar que los laboratorios han empleado bien los protocolos enviados.
- No se han recibido quejas o reclamaciones por parte de los participantes desde el inicio del programa hasta la fecha de emisión del informe.

Una vez que el proveedor ha asegurado y comprobado que se han cumplido todos los requisitos mencionados y disponga de los resultados de todos los laboratorios que han participado en el ejercicio, se procede a procesar los resultados y a evaluar su calidad en base a los requisitos establecidos en la norma de aplicación.

## 3. ANÁLISIS DE DATOS Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS DEL EJERCICIO DE INTERCOMPARACIÓN

Una vez que todos los laboratorios han enviado los resultados de sus ensayos al proveedor, éste lleva a cabo su análisis y evaluación para la emisión de un informe final.

### 3.1. Análisis de datos y registros

Antes de comenzar con el análisis de datos y registros, el proveedor debe validar todo el equipo de procesamiento de datos y asegurar el correcto almacenamiento de la información.
El mantenimiento del sistema informático deberá incluir un proceso de copia de seguridad y un plan de recuperación del sistema. Los resultados de tal mantenimiento y de las verificaciones operativas deberán quedar registrados.

Además, el proveedor debe establecer una sistemática para validar y chequear los datos recibidos por los participantes antes de proceder a realizar su análisis estadístico. En primer lugar, a la recepción de los datos enviados por los laboratorios, se comprobará que no haya errores de bulto tales como errores de posicionamiento de comas en los resultados con decimales, que en alguna de las cifras se haya introducido un número a mayores o que se intuya que ha habido un intercambio de cifras entre celdas. En estos casos, el proveedor contactará con el laboratorio con el fin de que le envíe la hoja de cálculo corregida. En caso de que no la envíen, el proveedor podrá tomar la decisión de eliminar dichos valores.

Una vez descartados los errores de bulto, el proveedor debe introducir los resultados de todos los participantes en la hoja de cálculo diseñada para el tratamiento estadístico con el código correspondiente a cada laboratorio. Para verificar la validez de la transferencia de los datos, primero se introducirán los resultados de todos los laboratorios en una pestaña y, una vez se hayan introducido todos los resultados, se repetirá el mismo procedimiento en una segunda pestaña. Tras introducir los resultados en las dos pestañas, se revisará una tercera pestaña de chequeo de datos para comprobar que coinciden los resultados de cada laboratorio en ambas pestañas. En el caso de que todos los resultados introducidos en las dos primeras pestañas coincidan uno a uno, aparecerá un mensaje indicando que la transferencia de datos ha sido

correcta y, por lo tanto, el proveedor podrá seguir adelante con el tratamiento estadístico de los datos.

El análisis estadístico llevado a cabo en la hoja de cálculo a partir de los resultados aportados por los participantes, deberá generar un resumen estadístico, estadísticas de desempeño e información coherente con el diseño estadístico del programa de ensayos de aptitud. Será necesario que el proveedor establezca un procedimiento de validación que asegure la validez de los cálculos realizados en cada una de las hojas de cálculo diseñadas. En este caso, las validaciones de cada una de las pestañas de cálculo se realizarán de forma manual y de forma automatizada en nuevas hojas de cálculo destinadas a tal fin.

Con el fin de minimizar la influencia de los valores atípicos en el resumen estadístico, el proveedor utilizará en el tratamiento de datos métodos estadísticos robustos o pruebas apropiadas para detectar valores estadísticos atípicos como los test de Cochran o de Grubbs.

### 3.2. Obtención de datos estadísticos para poder realizar la evaluación del desempeño

Con el fin de satisfacer el propósito del programa, el proveedor de ensayos de aptitud debe utilizar métodos de evaluación válidos. Estos métodos se deben documentar y deben incluir una descripción de las bases para la evaluación por parte de los laboratorios. Además, los datos tendrán que ser tratados por un experto estadístico con experiencia acreditada en el tratamiento de datos acústicos, lo cual facilitará la comprensión de los resultados obtenidos.

La evaluación del desempeño de los participantes en un ejercicio de intercomparación acústica, se lleva a cabo empleando los procedimientos establecidos en la norma ISO 13528:2005 [2]. En esta norma se detallan todos los parámetros estadísticos y cálculos incluyendo:

- Cálculos estadísticos para el diseño y la interpretación de los ensayos de aptitud.
- La presentación de descripciones detalladas de métodos estadísticos que se utilizan en el análisis de los datos obtenidos de los programas de ensayos de aptitud.
- La presentación de recomendaciones sobre su utilización en la práctica.

A partir de las indicaciones de esta norma y tomando como referencia el documento G-ENAC-14 [3], una vez calculados los valores promedio, la desviación y típica y la varianza de los resultados aportados por cada laboratorio, se determinan los siguientes parámetros:

- Valor asignado (x): obtenido según el método de consenso entre los laboratorios participantes, correspondiéndose al valor promedio robusto de los resultados obtenidos por los laboratorios participantes de acuerdo al análisis robusto del algoritmo A del anejo C de la norma ISO 13528:2005.

- Desviación estándar diana u objetivo ($\sigma_p$): obtenida mediante el promedio de las desviaciones estándar calculadas en ejercicios de intercomparación anteriores organizados por el proveedor o bien a partir de lo indicado en la norma ISO 12999-1:2014.

- Desviación estándar del ejercicio ($\sigma_{ejercicio)}$): obtenida mediante la desviación estándar que describe la dispersión estándar de resultados de los participantes en el ejercicio de intercomparación.

- Incertidumbre del valor asignado ($u_x$): calculada a partir de la desviación estándar del ejercicio y del número de laboratorios participantes.

- Z-score: parámetro para la evaluación del rendimiento de los laboratorios, calculado a partir de la media de cada laboratorio participante, el valor asignado por consenso y la desviación estándar diana u objetivo.

### 3.3. Evaluación de la calidad de los resultados del ejercicio de intercomparación

Con el fin de ayudar a la interpretación y evaluación de los resultados del ensayo de aptitud, es necesario transformarlos en un estadístico de desempeño. De este modo, será posible medir la desviación del resultado de ensayo de cada participante con el valor asignado y evaluarla con criterios de desempeño.

Es este caso, para la evaluación del desempeño se utilizará el parámetro estadístico "z-score" comentado en el apartado anterior, que se define de acuerdo con la ecuación:

$$z = \frac{x - x_a}{\sigma_p}$$

Donde:

- $x_a$ es el valor asignado por consenso (la media robusta de los resultados remitidos por los laboratorios)
- $\sigma_p$ es la desviación estándar diana o adecuada al fin pretendido
- $x$ es la medida del laboratorio participante

El criterio de interpretación empleado para la evaluación de los resultados obtenidos por los laboratorios en este estadístico es el siguiente:

- $|Z| \leq 2 =$ satisfactorio
- $2 < |Z| \leq 3 =$ cuestionable
- $|Z| > 3 =$ no satisfactorio

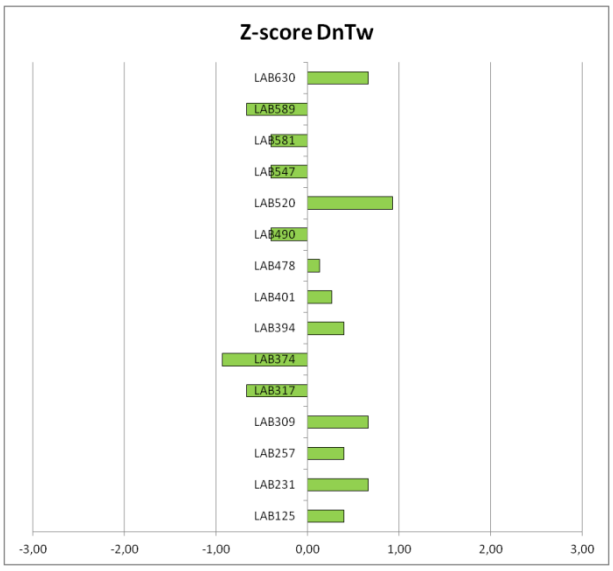



Figura 1 –Ejemplo de z-score satisfactorio

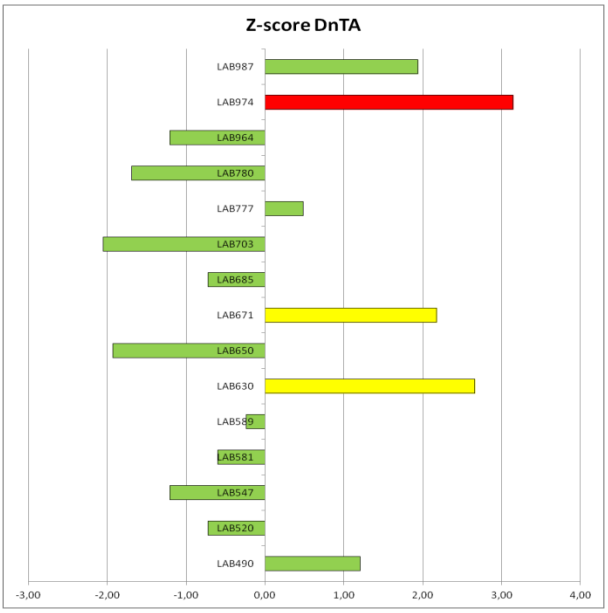



Figura 2 –Ejemplo de z-score no satisfactorio

Además de evaluar el desempeño en base a los resultados del "z-score", con el objetivo de determinar la calidad de los resultados del ejercicio, el proveedor evaluará también los siguientes aspectos:

- Relación entre la desviación estándar del ejercicio y la desviación estándar diana u objetivo:

El valor de dispersión de los resultados obtenidos por el conjunto de los participantes en el ejercicio de intercomparación es un excelente indicador de la calidad del ejercicio. Por este motivo, se evalúa la relación entre la desviación estándar del ejercicio ($\sigma_{ejercicio}$) y la desviación estándar diana u objetivo ($\sigma_p$). De una manera general, puede decirse que en los casos que:

$$\hat{\sigma}_{ejercicio} > 1.2\ \sigma_p$$

puede suceder que o bien el conjunto de los laboratorios tiene dificultades para obtener la precisión requerida o que los resultados aportados no se corresponden con una distribución normal sino que representan dos o más poblaciones.

- Relación entre la incertidumbre del valor asignado y la desviación estándar diana u objetivo:

Una relación adecuada entre la incertidumbre del valor asignado ($u_{x_a}^2$) y la desviación estándar diana u objetivo ($\sigma_p$) sería:

$$\frac{u_{x_a}^2}{\sigma_p} \leq 0.1$$

Cuando esta relación supere el valor de 0,5, el proveedor deberá informar a los participantes de que la evaluación realizada debe considerarse solamente a título informativo.

- Histogramas:

La representación gráfica en forma de histograma de los datos o parámetros de evaluación del rendimiento ayudará al proveedor a visualizar la distribución de los resultados obtenidos y le facilitará la interpretación de algunos aspectos difícilmente evaluables sólo mediante datos numéricos como, por ejemplo, la normalidad de la distribución.

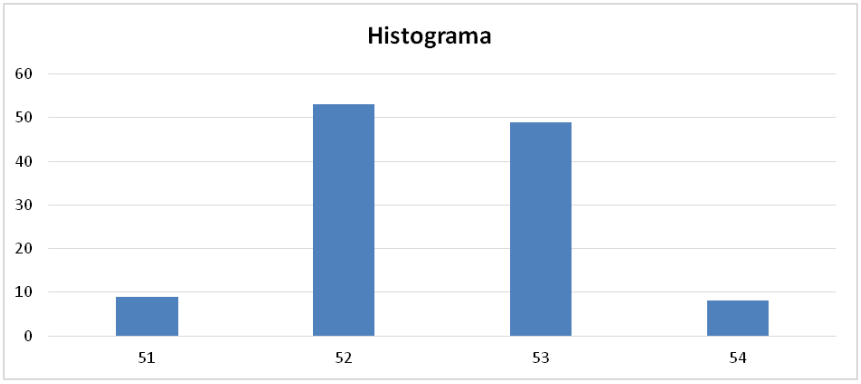



Figura 3 – Ejemplo de histograma con distribución unimodal

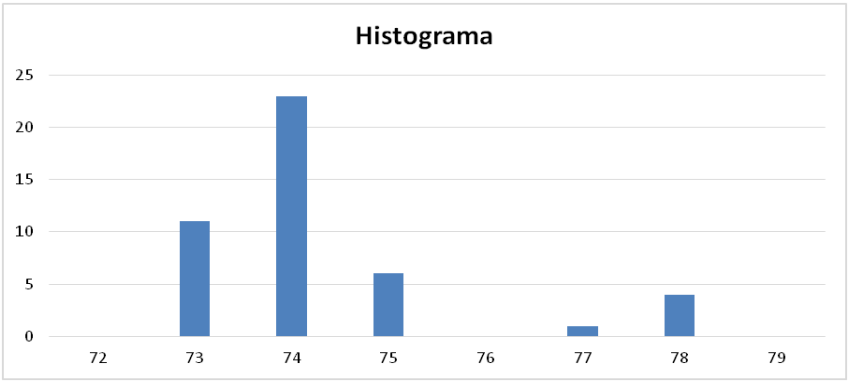



Figura 4 – Ejemplo de histograma con distribución bimodal

### 3.4. Casos de evaluación de la calidad de los resultados de un ejercicio de intercomparación

#### 3.4.1. Caso 1: Evaluación satisfactoria

El proveedor considerará que la calidad de los resultados obtenidos de un ejercicio de intercomparación es satisfactoria cuando todos los valores del "z-score" sean satisfactorios, es decir, estén comprendidos entre -2 y 2, y el resto de indicadores cumplan los requisitos de calidad indicados, es decir, que la relación entre la desviación estándar del ejercicio y la desviación estándar diana u objetivo sea menor que 1.2 y que la relación entre la incertidumbre del valor asignado y la desviación estándar diana u objetivo sea menor o igual que 1.

#### 3.4.2. Caso 2: Evaluación no satisfactoria

Se puede dar el caso de que los valores del "z-score" sean satisfactorios, es decir, se encuentren entre -2 y 2, pero el resto de indicadores no cumplan con los requisitos de calidad establecidos, es decir, que la relación entre la desviación estándar del ejercicio y la desviación estándar diana u objetivo sea mayor que 1.2 y/o que la relación entre la incertidumbre del valor asignado y la desviación estándar diana u objetivo sea mayor que 1. Esto puede ocurrir porque exista una gran dispersión de los resultados o porque los resultados se distribuyan de forma no unimodal. En estos casos, el proveedor considerará que la calidad de los resultados obtenidos de un ejercicio de intercomparación no es satisfactoria.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

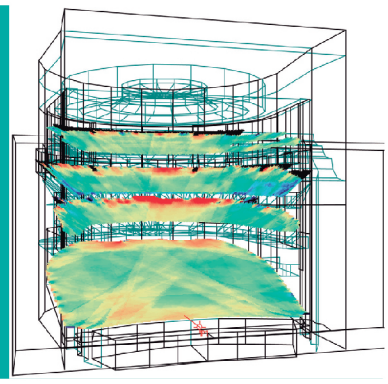
[1] **UNE-EN ISO/IEC 17043:2010.** Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para los ensayos de aptitud (ISO/IEC 17043:2010).
[2] **ISO 13528:2005.** Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons.
[3] **G-ENAC-14 Rev. 1 Septiembre 2008**. Guía sobre la participación en programas de intercomparaciones.
[4] **NT-03 Rev.5 Septiembre 2012**. Política ENAC sobre Intercomparaciones

# Acousticware

software and hardware for acousticians

Desarrolladores y proveedores de software y dispositivos para ingeniería acústica

**Odeon**, la herramienta software más avanzada para acústica de salas. Calcula todos los parámetros acústicos de tu auditorio, sala de conferencias, oficina, etc.



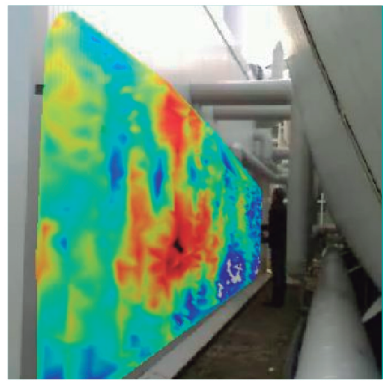
El nuevo **Analizador Nor150** posee una gran pantalla táctil y a todo color, cámara y GPS, que hacen de este dispositivo uno de los más sencillos de utilizar del mercado.





**Sistema Multicanal Nor850**

Crea el equipo óptimo para tu modelo de trabajo y compleméntalo con el software específico para cada aplicación.

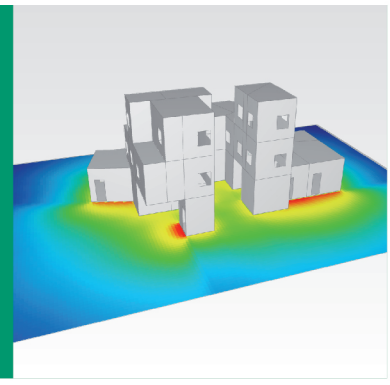


**Scan&Paint**, o cómo abordar fácil y rápidamente tareas como medidas de intensidad sonora, localización de fuentes de ruido, medida de potencia, etc.

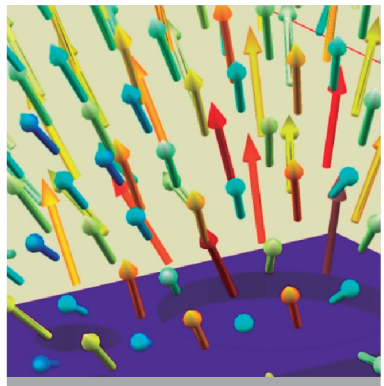


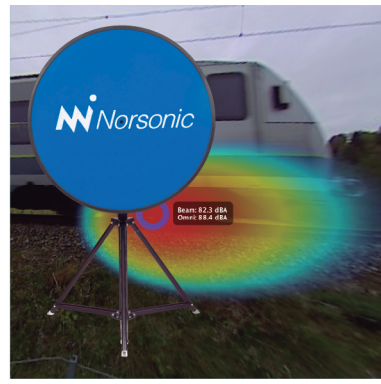
**Fuentes de ruido** para acústica en edificación. Omnidireccional, ruido de impactos, fachadas, etc. Destacan su ligereza y su facilidad de uso.

**SONarchitect**, la herramienta más potente para el cálculo de aislamientos acústicos según la norma EN 12354 en todo el edificio.

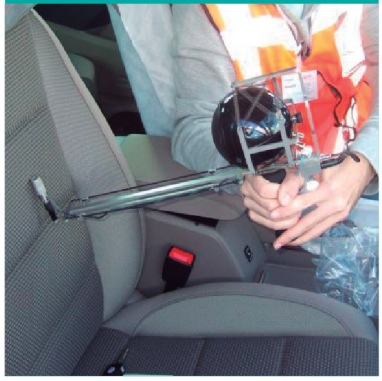


**In-situ Absorption**: otra de las aplicaciones del sensor de velocidad de partículas para medición de absorción acústica sin necesidad de ensayo en cámara reverberante.



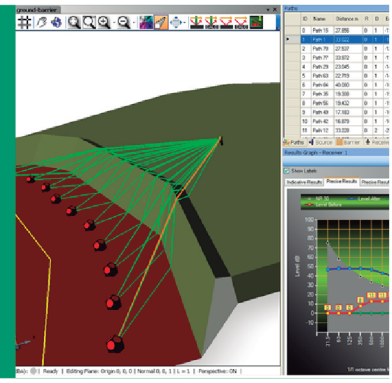



Con la **Acoustic Camera Nor848A, Norsonic** da un paso más en la localización de fuentes de ruido con su alto número de micrófonos y su tamaño compacto.



**Scan&Paint 3D** aporta una nueva dimensión a la hora de caracterizar una fuente de ruido. Medidas de intensidad en tres dimensiones, patrones de radiación, etc.

**OTL Terrain** es una herramienta perfecta para aquellos proyectos a media, pequeña escala en los que es necesario predecir niveles de ruido ambiental.



TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA NUEVA REVISIÓN DE LA NT-45 DE ENAC PARA LABORATORIOS ACREDITADOS

PACS: 43.10.Qs

Carro Rejas, Carmen;
ENAC (Entidad Nacional de Acreditación).
C/Serrano 240, Madrid, España
Tel. 91 457 32 89
Email. ccarro@enac.es

**ABSTRACT**

**ENAC TECHNICAL NOTE NT-45 (REV. 1), PASSED IN FEBRUARY 2009, LAID THE BASIS FOR ORGANIZATIONS SEEKING ACCREDITATION AS AN ACOUSTIC TESTING LABORATORY (ISO/IEC 17025). SINCE THEN, ACOUSTIC LABORATORIES HAVE MOVE FORWARD, AS WELL AS THE ACCREDITATION ASSESSMENT CRITERIA, PROVIDING AN APPROPRIATE BACKGROUND TO UPDATE THIS DOCUMENT. THIS PRESENTATION HIGHLIGHTS THE MOST SIGNIFICANT CHANGES: PRACTICAL EXAMPLES OF ACCREDITATION SCOPES, REQUEST REVIEW, USE OF THE ACCREDITATION MARK, CONFORMITY STATEMENTS OR ASSESSMENT CRITERIA FOR MULTI-SITE LABORATORIES, AMONG OTHERS.**

**RESUMEN**

**LA NT-45 (REV. 1), DE FEBRERO DE 2009, SENTÓ LAS BASES PARA LA ACREDITACIÓN DE ORGANIZACIONES COMO LABORATORIOS DE ENSAYO (UNE-EN ISO IEC 17025:2005) EN EL ÁMBITO DE LA ACÚSTICA. EN EL TIEMPO TRANSCURRIDO, SE HA OBSERVADO LA EVOLUCIÓN DE LOS LABORATORIOS, ASÍ COMO DE LOS CRITERIOS DE ACREDITACIÓN, ACTUALIZANDO CON ESTA EXPERIENCIA EL DOCUMENTO A SU REVISIÓN 2 (ENERO DE 2015). EN ESTA PONENCIA SE PONEN EN RELIEVE LOS CAMBIOS MÁS DESTACADOS: EJEMPLOS PRÁCTICOS DE ALCANCES DE ACREDITACIÓN, REVISIÓN DE LAS SOLICITUDES, RESPALDO DE LA MARCA DE ACREDITACIÓN DE ENAC, DECLARACIONES DE CONFORMIDAD O LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE ENTIDADES ORGANIZADAS POR EMPLAZAMIENTOS.**

La publicación de la Nota Técnica 45 (NT-45) en febrero de 2009, supuso la homogeneización de los organismos acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC en adelante)

para la realización de ensayos acústicos bajo un mismo esquema normativo, el de la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005, según el cual ENAC evalúa y declara la competencia técnica de los mismos para la realización de actividades como el muestreo o la medición de ruido ambiental, vibraciones, condiciones acústicas de la edificación y los elementos constructivos, acústica de recintos, potencia sonora, etc.

Una vez sentadas las bases del esquema, ha transcurrido ya un tiempo durante el que ha habido una evolución de la acreditación y del campo de ensayos acústicos. En base a la experiencia adquirida y con el fin de adaptar los criterios a los requisitos de acreditación actuales, se inicia en el año 2014 la revisión de la NT-45, que sale finalmente a la luz en Enero de 2015 en su versión segunda.

Las Notas Técnicas son documentos que ENAC edita si entiende que es preciso fijar criterios sobre actividades o aspectos concretos. En este sentido, la NT-45 es un documento imprescindible para el desarrollo de la acreditación en el ámbito de acústica. Los criterios que recoge son siempre complementarios a los establecidos para laboratorios de ensayo, en el Procedimiento de Acreditación (PAC-ENAC-LEC) y en los Criterios Generales de Acreditación (CGA-ENAC-LEC).

En esta comunicación se tratan los cambios que recoge la última revisión de la NT-45, destacando los que afectan a diferentes aspectos de la acreditación: alcance, criterios y proceso de evaluación.

**OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN:**

La revisión anterior de la NT-45 era de aplicación a la acreditación según los Reales Decretos 1367/2007 y 1371/2007, dos divulgados documentos que recogen los métodos de evaluación de medidas de ruido ambiental y de acústica en edificación a nivel nacional, respectivamente.
La revisión 2 amplía el campo de aplicación a todos los laboratorios acreditados en el ámbito de la acústica, independientemente de su alcance de acreditación. Esto ha permitido que todos los laboratorios puedan contar con Listados de Documentos Normativos que son gestionados de manera autónoma por el laboratorio y controlada mediante las evaluaciones de ENAC. Gracias a ello, aquellos documentos que aplican en un ámbito más específico, como son: Decretos Autonómicos, Ordenanzas Municipales, Instrucciones Técnicas propias de algún organismo o cliente, Directivas en constante revisión, etc., son también documentos con los que el laboratorio puede trabajar al amparo de la acreditación de ENAC, con la consiguiente simplificación y claridad de los alcances. Los Listados de Documentos Normativos son, por tanto, listados controlados por el laboratorio, que complementan su alcance acreditado por ENAC.

**ALCANCE, LDN y LDNi:**

La acreditación se circunscribe a un alcance de acreditación en el que se describen de forma clara, precisa y sin ambigüedades las actividades acreditadas (PAC-ENAC-LEC Rev. 5, Aptado. 4). Así, los alcances del ámbito de acústica recogen los métodos normativos para los que el laboratorio puede trabajar al amparo de la acreditación [**¡Error! No se encuentra el**

**origen de la referencia.**]. Adicionalmente, la NT-45 permite ampliar estos métodos, gracias a la gestión de los Listados de Documentos Normativos.

Figura 1: Ejemplo de Alcance de Acreditación en el que se hace mención al LDN

**ANEXO TÉCNICO**
**ACREDITACIÓN Nº 0 /LE 0000**

**Entidad: NOMBRE DEL LABORATORIO**
Dirección: ubicación de la sede central del laboratorio
Unidad Técnica: Dirección de un emplazamiento

**Norma de referencia: UNE-EN ISO/IEC 17025: 2005, CGA-ENAC-LEC**

**Título: Acústicos**
**Categoría I (Ensayos "in situ)**

| PRODUCTO/MATERIAL A ENSAYAR | ENSAYO | NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO |
|---|---|---|
| Ruido ambiental | Muestreo espacial y temporal de niveles de ruido ambiental | Anexo IV del Real Decreto 1367/2007 de 19 de octubre |
| | Medida de los Niveles de Ruido Ambiental | Anexo IV del Real Decreto 1367/2007 de 19 de octubre |
| Edificios y elementos constructivos | Muestreo en edificios y elementos constructivos | Real Decreto 1371/2007 de 19 de Octubre por el que se aprueba el documento básico "DB-HR Protección frente al ruido" |
| | Medida de aislamiento acústico al ruido aéreo entre locales | UNE-EN ISO 140-4:1999<br>UNE-EN ISO 16283-1:2015<br>Excepto Apdo. 7.5 |
| | Medida de aislamiento acústico al ruido aéreo de fachadas (método global del altavoz) | UNE-EN ISO 140-5:1999 |
| | Medida de aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos | UNE-EN ISO 140-7:1999 |
| Locales y recintos | Medida del tiempo de reverberación | UNE-EN ISO 3382-2:2008<br>UNE-EN ISO 3382-2:2008<br>Erratum:2009 V2 |

**Nota: El laboratorio mantiene un listado controlado y público de los Documentos Normativos que ha analizado y para los que ha concluido que dispone de la adecuada capacidad técnica.**

Uno de los cambios de la Rev. 2 es la incorporación de un Listado de Documentos Normativos Implícitos (LDNi), documento que controla el laboratorio, y que, junto con el Listado de Documentos Normativos (LDN), recogen aquellos documentos para los que el laboratorio ha concluido que dispone de la adecuada capacidad técnica para trabajar conforme a sus requisitos, teniendo en cuenta su alcance de acreditación. Se clasifican estos documentos entre los que tienen carácter normativo de ámbito general y sectorial, a nivel estatal, autonómico y municipal, y aquellos otros que son particulares de una empresa o cliente, como pueda ser una autorización ambiental integrada. En el primer caso se incluirán en el LDN [Figura 2], listado público y común en todos los emplazamientos del laboratorio acreditado. En el segundo caso, aquellos documentos que recogen requisitos específicos de un cliente se incluirán en el LDNi, listado interno y particularizado para cada emplazamiento del laboratorio.

Ambos listados son gestionados por los responsables designados dentro del laboratorio, que irá incorporando documentos en función de sus solicitudes. Los listados están a disposición de la Administración y de ENAC, que auditará su control y gestión en cada una de sus evaluaciones, pudiendo excluir de ellos documentos si se dieran incumplimientos de lo establecido en los criterios de la NT-45.

Figura 2: Ejemplo de un LDN con los campos de contenido mínimo

| **TÍTULO:** LDN / LDNi | **ANEXO TÉCNICO Nº [revisión en vigor]** |
|---|---|
| **DOCUMENTO NORMATIVO** | **FECHA DE INCLUSIÓN** |
| Decreto 266/2004 de 3 de diciembre del Consell de la Generalitat | 21/10/2015 |
| Decreto 104/2206 del Consell, Disposición adicional primera por la que se modifica el Decreto 266/2004 | 22/10/2015 |
| Ordenanza Municipal de Protección Contra la Contaminación Acústica del Ayuntamiento de Valencia | 23/10/2015 |

**REVISIÓN DE OFERTAS, PEDIDOS Y CONTRATOS:**

Ante una solicitud de trabajo, el laboratorio debe realizar un análisis para estudiar si puede realizarlo amparado por la acreditación de ENAC. Para ello, habrá designado nominalmente al personal técnico encargado de ello, así como de la gestión del Listado de Documentos Normativos. Si el trabajo se va a realizar al amparo de alguno de los documentos recogidos en su Anexo Técnico, el uso de la marca de acreditación en el informe de resultados es preceptivo (CEA-ENAC-01). Si se trata de cualquier otro requerimiento (Decreto Autonómico, Ordenanza Municipal, Autorización Ambiental Integrada, etc.) debe realizar un análisis justificativo de que éstos contienen técnicas de muestreo/ensayo que quedan cubiertos por el alcance acreditado, documentando: las diferencias detectadas, las acciones a llevar a cabo para resolverlas, así como el personal, los medios, etc. con los que se desarrollará el trabajo contratado.

Ejemplos de diferencias que pueden ser objeto de este análisis son: duración de los tiempos de medida, localización o número de posiciones de medida, ubicación de las fuentes sonoras patrón, criterios para declarar conformidad, cálculo de penalizaciones, criterios de inferencia para los muestreos, etc. Estas diferencias puede requerir de medios adicionales a los que dispone el laboratorio para desarrollar las actividades de acreditación: nuevas capacidades en los equipos de medida, nuevos programas de cálculo, etc.

Como conclusión, el laboratorio declarará, en función de un análisis justificativo, si es competente o no para la realización de los trabajos bajo el alcance de acreditación, y comunicará a su cliente en caso negativo que su acreditación no cubre estas actividades, no pudiendo hacer uso de la condición de acreditado. En caso afirmativo, el personal encargado incluirá el documento analizado en el LDN/LDNi, con su correspondiente fecha de inclusión, conservando el análisis justificativo realizado, que debe ser difundido al personal implicado en la realización del trabajo. Como producto de ese trabajo, el laboratorio podrá emitir un informe con su marca de acreditación y todo ello será objeto de evaluación por parte de ENAC

**EMPLAZAMIENTOS Y PERSONAL DESPLAZADO:**

En la NT-45 Rev. 2 se reestructura la información sobre el personal desplazado y los emplazamientos de los laboratorios acreditados, recogiéndose su definición en el Apartado 2, los criterios que deben cumplir en los Apartados 4.1 y 4.8 y los condicionantes para su evaluación en el Apartado 5.

Personal técnico desplazado es aquel que no se encuentra habitualmente en las instalaciones que aparecen en el alcance de acreditación, pero que dependerá en todos los aspectos de un emplazamiento acreditado. Este emplazamiento deberá demostrar en las evaluaciones que ejerce sobre su personal desplazado un control adecuado.

Emplazamiento acreditado será aquel en el que se desarrolla alguno de los procesos definidos como clave en la NT-45, y su dirección física aparecerá en el alcance de acreditación. En caso de disponer el laboratorio de emplazamientos, se designará una única Dirección Técnica. Deben estar documentadas claramente las personas que forman parte de cada emplazamiento, las actividades realizadas en cada centro, así como las relaciones y responsabilidades entre ellos.

En función del personal desplazado, de los emplazamientos y de las actuaciones que se llevan a cabo desde cada uno de los centros acreditados, se planificarán las distintas evaluaciones de ENAC, con las premisas indicadas en la NT-45. Así, la evaluación se hará en todos los centros acreditados en las auditorías iniciales, mientras que en las demás se escogerá una muestra representativa de emplazamientos, incluyendo siempre la sede central.

**INFORMES Y REGISTROS:**

Los requisitos sobre registros e informes que recoge la norma de referencia UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 son aplicables a todos los laboratorios de ensayo, y a ellos se suman los aspectos de la NT-45 para los informes en el ámbito de la acústica.

Los informes emitidos por el laboratorio bajo el alcance de acreditación de ENAC contendrán:

- Una identificación clara del método normativo en base al que se realiza el muestreo y/o ensayo, y frente al que se declara conformidad.

- Cuando se haya llevado a cabo, información del muestreo, de tal manera que quede avalada la representatividad de las medidas llevadas a cabo y que permiten declarar conformidad al ítem completo. En este sentido, no se considera muestreo representativo la simple elección aleatoria de muestras.

- En los casos en que aplique, la declaración de conformidad; ésta se considera parte inherente del ensayo.

- La incertidumbre expandida del resultado del ensayo, salvo si el documento frente al que se declara conformidad indica expresamente lo contrario. Debe aportarse esta incertidumbre cuando ésta afecte al cumplimiento con los límites de una especificación, tanto si dicha especificación ha sido comunicada explícitamente al laboratorio por un cliente o, de manera implícita, cuando los ensayos solicitados tienen como fin el comprobar el cumplimiento de una especificación conocida por ser pública y la habitualmente utilizada para comparar los resultados de dichos ensayos.

- Si en la evaluación del cumplimiento con un límite normativo, a causa de la incertidumbre, no puede declararse el cumplimiento o incumplimiento con un límite, deberá indicarse, evitando cualquier tipo de declaración ambigua. No obstante, en el informe el laboratorio podrá indicar el hecho objetivo de que, obviando la incertidumbre, el resultado del ensayo queda por encima o por debajo del límite legal, o expresiones semejantes: supera/no supera, con el fin de dar una información interpretable y concisa para el receptor del informe.

Los informes acreditados se identificarán, al menos en la primera página, con cualquiera de los identificadores de la acreditación de ENAC que se recogen en la [Figura 3], denominados genéricamente como “marca” de acreditación. Al pie de la marca se recogerá el número de acreditación, que identifica unívocamente a cada laboratorio de ensayo. La marca de reconocimiento internacional ENAC/ILAC MRA, se concede a laboratorios que hayan solicitado su uso y asumido las obligaciones contractuales que conlleva. En el caso de la referencia a la condición de acreditado, la frase usada debe ser idéntica a la indicada.

Figura 3: Identificadores de la acreditación de ENAC

***MARCA ENAC:***

ENAC
ENSAYOS
Nº

***MARCA ENAC/ILAC MRA:***

ilac-MRA ENAC
ENSAYOS
Nº

***REFERENCIA A LA CONDICIÓN DE ACREDITADO:***
***"Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC con acreditación Nº XXX/ LE 0000"***

El laboratorio acreditado debe usar su marca cumpliendo los requisitos del documento CEA-ENAC-01. Así, los resultados de las actividades realizadas al amparo de los documentos del alcance de acreditación, del LDN o del LDNi, deben informarse con marca de acreditación. Por ejemplo, para la medición del aislamiento al ruido aéreo entre un recinto y su colindante debe emitirse un informe acreditado si se dispone de la norma UNE-EN ISO 16283-1 en el alcance, pudiendo ser un informe simplificado. Las plantillas recomendadas en el Anexo B de la propia norma son un modelo de informe simplificado, que seguirá los requisitos que recoge el apartado 5.10.1 de la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 y del documento CGA-ENAC-LEC.

Únicamente en circunstancias excepcionales (CEA-ENAC-01 Aptado 6.3), los laboratorios no harán uso de la marca en informes de actividades que estarían dentro del alcance de su acreditación. En esos casos, el cliente recibirá información clara de que va a recibir resultados de actividades realizadas sin garantía de cumplimiento de los requisitos de la acreditación de ENAC.

## ESTADO DE LA ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS DE ACÚSTICA

La acreditación de laboratorios de acústica es gestionada por el Departamento de Medio Ambiente de ENAC, que cuenta con 2 Técnicos de Sector dedicados a esta actividad. Actualmente (septiembre de 2015) son 84 los laboratorios acreditados para ensayos acústicos. Estos laboratorios se distribuyen entre las distintas Comunidades Autónomas según los datos de la Tabla 1:

Tabla 1: Número de laboratorios de ensayos acústicos acreditados, por Comunidad Autónoma

| COMUNIDAD AUTÓNOMA | Nº LABORATORIOS | COMUNIDAD AUTÓNOMA | Nº LABORATORIOS |
|---|---|---|---|
| Comunidad Valenciana | 25 | Navarra | 2 |
| Castilla y León | 13 | Castilla la Mancha | 2 |
| Comunidad de Madrid | 13 | Islas Baleares | 1 |
| Cataluña | 10 | La Rioja | 1 |
| Andalucía | 7 | Galicia | 1 |
| País Vasco | 5 | Murcia | 1 |
| Asturias | 3 | | |

## NOVEDADES EN LA ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS DE ACÚSTICA

- Desde finales del año 2014, los laboratorios acreditados han ido adaptando sus alcances a la nueva norma UNE-EN ISO 16283-1 que anula y sustituye a la norma UNE-EN ISO 140-4:1999, habiendo 10 laboratorios acreditados (dato de 1/09/15). Se espera que las partes 2 y 3 de la norma se publiquen próximamente en su versión ISO.
- La norma UNE-EN ISO 17025 se encuentra actualmente en revisión, con previsión de que se publique una nueva edición durante el próximo año 2016.
- Las suspensiones y retiradas de acreditaciones son comunicadas a los contactos de aquellas Comunidades Autónomas donde es necesaria la acreditación para actuar como entidad reconocida por la Administración para la realización de ensayos acústicos.
- Durante este año, se ha incrementado la presencia de ENAC en la redes sociales con la apertura de cuentas en Twitter [https://twitter.com/enac_acredita] y LikedIn [https://www.linkedin.com/company/entidad-nacional-de-acreditación].

## BIBLIOGRAFÍA:

- NT-45 Rev.1 y Rev.2, Laboratorios de Ensayo: Acreditación en el ámbito de la acústica.
- UNE-EN ISO/IEC 17025:2005, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- PAC-ENAC-LEC Rev.5, Procedimiento de Acreditación de Laboratorios.
- CGA-ENAC-LEC Rev.5, Criterios Generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración según norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005.
- CEA-ENAC-01 Rev.14, Criterios para la utilización de la marca ENAC o referencia a la condición de acreditado.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONTROL, LOGÍSTICA Y MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURAS E ITEMS EN PROGRAMAS DE INTERCOMPARACIÓN ACÚSTICA

PACS: 43.15.+s

Espinel Valdivieso, Ana; Bravo Arranz, Daniel; Ausejo Prieto, Miguel; Arenaz Gombau, Angel
AUDIOTEC Ingeniería Acústica S.A.
C/ Juanelo Turriano, 4. Parque Tecnológico de Boecillo.
47151 BOECILLO (Valladolid), España
Tel: 00 34 983 36 13 26 Fax: 00 34 983 36 13 27
E-Mail: info@audiotec.es Web: www.audiotec.es

**ABSTRACT**

To ensure a correct development and fastness of the environmental conditions items on the interlaboratory comparasion exercises, it is very important to maintain a correct control and maintenance of them during the whole process. In this way, issues which introduce variability in results between laboratories are removed ensuring the objectivity of them.

In this document, AUDIOTEC record the types of controls and the maintenance should be done for this purpose, recording some practical examples based in other recent interlaboratory comparasion exercices.

**RESUMEN**

Para garantizar un adecuado desarrollo e inalterabilidad de las condiciones de ítems y entorno en un ejercicio de intercomparación entre laboratorios, es primordial un correcto control y mantenimiento de los mismos a lo largo de todo el proceso. De esta manera, se eliminan aspectos que pudieran introducir variabilidad en los resultados entre laboratorios y se garantiza el rigor y objetividad de los mismos.

En la presente comunicación, el equipo de logística de AUDIOTEC expondrá los tipos de controles y mantenimientos que lleva a cabo en su colaboración como desarrollador de la logística para proveedores de intercomparación, exponiendo algún ejemplo práctico de los mismos basado en ejercicios de intercomparación recientes.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ejercicios de intercomparación consisten en la *"evaluación mediante mediciones o ensayos sobre el mismo ítem o ítems similares por dos o más laboratorios de acuerdo a unas condiciones predeterminadas"*, según se describe en la norma UNE-EN ISO/IEC 17043:2010.

Por este motivo, se hace primordial, que tanto los ítems de ensayo, como las condiciones predeterminadas establecidas para dichos ensayos estén controlados y se mantengan en las mismas condiciones para todos los laboratorios para garantizar el correcto desarrollo del ejercicio.

Por tanto, un ejercicio de intercomparación entre laboratorios de calidad, exige un control y mantenimiento exhaustivo y periódico para evitar cualquier tipo de variabilidad que pudiera

existir durante todo el ejercicio, en todo lo que tuviera que ver con la caracterización de ítems, caracterización de entorno de ensayo, estado y disponibilidad de las infraestructuras necesarias, control de instalaciones, apoyo logístico a los laboratorios participantes, etc.

AUDIOTEC, dentro de sus servicios como proveedor de logística a proveedores de intercomparaciones, facilita que los Laboratorios participen en igualdad de condiciones, velando expresamente por garantizar la homogeneidad y estabilidad de los ítems de ensayo y su entorno, así como poniendo a disposición las infraestructuras adecuadas al fin pretendido durante todo el desarrollo de la intercomparación.

## 2. REFERENCIAS NORMATIVAS

La norma que regula los requisitos generales que deben cumplir los proveedores de programas de intercomparación, y establece los fundamentos en que debe desarrollarse adecuadamente una intercomparación es la norma UNE-EN ISO/IEC 17043:2010 “Requisitos generales para los ensayos de aptitud”.

En dicha norma, en varios apartados se citan ciertos requisitos relativos al control y logística que debe cumplir el proveedor para garantizar un adecuado desarrollo de un ejercicio de intercomparación. Algunos de ellos son los siguientes:

- Disposición, evaluación y preparación de la infraestructura e ítems necesarios para la operación del programa de ensayos de aptitud.
- Adecuada operativa en el envío de comunicaciones a los participantes (envío de protocolos, hojas de introducción de datos, etc…)
- Atención a los participantes durante su participación.
- Aseguramiento de que las condiciones ambientales existentes no comprometerán la calidad requerida de las operaciones.
- Controlar el acceso y la utilización de las áreas que afectan a la calidad del programa.
- Separación efectiva entre áreas vecinas en que se desarrollen actividades incompatibles con el objeto de evitar la contaminación cruzada.
- Controles programados y periódicos para asegurar la homogeneidad y estabilidad de los ítem bajo ensayo.

## 3. TIPOS DE CONTROLES Y MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURAS E ITEMS EN PROGRAMAS DE INTERCOMPARACIÓN ACÚSTICA

En los programas de intercomparación acústica lanzados en los últimos años por proveedores acreditados por ENAC, tales como AECOR, se considera fundamental el control y mantenimiento de ítems e infraestructuras.
Para ello el equipo de logística de AUDIOTEC incorpora entre los servicios que ofrece para la organización de intercomparaciones las funciones el control y mantenimiento de ítems e infraestructuras. Entre las tareas que lleva a cabo se encuentran las siguientes:

1) Selección preliminar de unas instalaciones adecuadas para el desarrollo de varios tipos de ensayos en materia acústica (aislamiento a ruido aéreo, a ruido de impactos, tiempos de reverberación, niveles sonoros, vibraciones….).
   En nuestro caso se han seleccionado unas instalaciones en Valladolid en las cuales se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:
   - Recintos próximos entre sí, para facilitar la optimización de realización de ensayos de los laboratorios en tiempo y espacio, pudiendo concentrar varios alcances en las mismas instalaciones.
   - Instalaciones no afectadas por otras actividades u focos sonoros externos o próximos que pudieran influir en los ensayos de los laboratorios.
   - Facilidad de acceso y transporte de instrumentación acústica de los laboratorios entre los distintos recintos para los diferentes tipos de ensayos.

2) Selección preliminar de recintos aptos para la realización de los ensayos conforme a normativa de referencia.
   Para esta selección se tienen en cuenta diversas consideraciones como las siguientes:
   - Dimensiones adecuadas para el correcto desarrollo de los ensayos.
   - Características acústicas de los cerramientos apropiadas para poder ser evaluados objetivamente.
   - Evitar la utilización de recintos con características similares a otros años con el fin de evitar el conocimiento previo de los resultados esperados.

3) Identificación “in situ” de cada tipo de recinto en función del tipo de alcance para facilitar la operativa de los laboratorios participantes.

4) Preparación del ítem e indicaciones “in situ” de todo tipo de consideraciones a tener en cuenta para garantizar la homogeneidad de condiciones y operativa para todos los laboratorios (por ejemplo, delimitación con cinta de las zonas válidas de medición, marcado sobre el suelo de los puntos de chequeo,…).

5) Realización de ensayos previos al inicio de la intercomparación de caracterización de ítems para cada uno de los tipos de alcances ofertados por el proveedor. Estos ensayos se realizan por parte del encargado de logística y sirven para posteriormente verificar la integridad de los ítems a lo largo de la intercomparación mediante la realización de un adecuado mantenimiento y comprobaciones intermedias y finales.

6) Comprobación de las condiciones meteorológicas y de entorno en las zonas de ensayo para cumplir con los requisitos de la normativa de referencia y establecimiento de unos criterios de aceptación/rechazo para todos los laboratorios que garantice el cumplimiento de los mismos previa realización de los ensayos por parte de cada laboratorio.

7) El técnico de logística de AUDIOTEC lleva a cabo un chequeo inicial, previo a la participación de cada Laboratorio, para verificar el estado del ítem y su estabilidad.
   Para los ensayos de niveles sonoros y de vibraciones se lleva a cabo una verificación en un punto de chequeo para asegurar que todos los participantes realizan estos ensayos bajo las mismas condiciones.

8) Almacenamiento y conservación de los equipos utilizados para los alcances de ensayos según RD1367/2007 (ruidos de actividades y vibraciones) y ensayos según UNE EN ISO 3746 (potencia), para evitar el deterioro de los mismos y garantizar su estabilidad en la participación de cada laboratorio.
   Se utiliza una forma y lugar de almacenamiento seguros, para evitar daños en los mismos. Estos equipos son: el equipo generador de ruido (RD1367/2007, ruidos de actividad), el equipo generador de vibraciones (RD 1367/2007, vibraciones en edificación) y el equipo cuya potencia se pretende determinar (UNE EN ISO 3746).

9) Entrega a cada laboratorio participante de un protocolo de ensayo normalizado y unas fichas por cada alcance en el que participe en el que se detallará, entre otra, la siguiente información para unificar criterios de actuación de cada laboratorio:
   - Identificación y descripción del ítem bajo ensayo.
   - Dimensiones, características, mobiliario y fotografías de cada recinto y/o zona de medida, así como croquis dimensionados de los mismos.
   - Condiciones meteorológicas válidas para la realización de los ensayos.
   - Condiciones de entorno y ruidos de fondo establecidas para cada tipo de alcance y que han sido validadas por el proveedor.
   - Procedimiento detallado de chequeo previo en los casos de los alcances según RD 1367/2007 para ruidos de actividad y vibraciones.
   - Metodología operativa común para todos los laboratorios.
   - Número de ensayos, parámetros de medida, rangos de medida y criterios comunes tenidos en cuenta en los mismos.

10) Planificación de un calendario ajustado de participación individual de cada laboratorio con objeto de evitar la contaminación cruzada, ya que evita la participación simultánea de varios laboratorios.

11) Preparación y comprobaciones del item previa a la participación de cada laboratorio:
    - Se comprueba que las salas se encuentren en las mismas condiciones para todos los Laboratorios.
    - Se comprueba que no existen desperfectos o deterioros en los cerramientos y revestimientos de cada recinto y que permanecen inalterables respecto a las condiciones iniciales.
    - Se comprueba que las condiciones ambientales, de ruido/vibración de fondo y de entorno existentes en los recintos o su exterior, cumplen con los requisitos especificados en las fichas de condiciones ambientales para el tipo de ensayo a realizar, así como las indicadas en el protocolo de intercomparación enviado a los participantes.
    - Para los alcances de ensayos según el RD1367/2007, para niveles sonoros y/o vibraciones, así como para el alcance de determinación de potencia acústica según la norma UNE EN ISO 3746, se comprueba que el equipo de reproducción sonora y/o el equipo generador de vibraciones, así como el equipo cuya potencia acústica se pretende determinar, funcionan correctamente y que no están deteriorados, y que en los puntos de chequeo se genera el nivel sonoro y/o vibratorio de referencia establecido al inicio de la intercomparación para cada uno de los alcances mencionados.
    - Para el alcance de ensayos de ruido de infraestructura viaria según el RD 1367/2007, se comprobará que las características de la autovía (tipo de tráfico, asfalto, velocidad, carriles, etc…) son las adecuadas para llevar a cabo el ensayo, así como que no existen obras u otras fuentes o elementos de ruido cercanas que pudieran influir en los ensayos.

*12)* Realización de un mantenimiento periódico y programado de los ítem.

13) Realización de ensayos periódicos de evaluación de ítems para cada uno de los tipos de alcances ofertados por el proveedor. Estos ensayos se realizan por el mismo responsable de logística de AUDIOTEC que participó en la caracterización inicial.
    - Dichos resultados se comparan con los resultados obtenidos inicialmente para verificar que las condiciones del ítem no han variado.

14) Realización de ensayos finales de evaluación de ítems para cada uno de los tipos de alcances ofertados por el proveedor. Estos ensayos se realizan por parte del encargado de logística y se tienen en cuenta las mismas consideraciones que en los ensayos periódicos.

    *Nota: Estos ensayos finales, así como los ensayos previos y los periódicos de mantenimiento y los chequeos correspondientes a algunos tipos de alcances son realizados por un técnico cualificado de AUDIOTEC y con equipos con sus certificados de calibración y verificación periódica en vigor emitidos por laboratorios acreditados ENAC, lo que garantiza la fiabilidad de resultados de los mismos para la validación de los ítems.*

15) Asistencia técnica y atención continua a los laboratorios participantes como apoyo en las dudas en lo concerniente a las condiciones de ensayo y requisitos comunes para todos los participantes.

Todos estos tipos de controles y logística garantizan que se desarrolle un ejercicio de intercomparaciones de calidad, proporcionando homogeneidad, estabilidad e igualdad de condiciones a todos los laboratorios participantes.

## 4. EJEMPLOS PRÁCTICOS BASADOS EN PROGRAMAS DE INTERCOMPARACIÓN RECIENTES EN LOS QUE EL EQUIPO DE LOGÍSTICA DE AUDIOTEC HA PARTICIPADO.

AUDIOTEC ha colaborado con distintos proveedores de intercomparación en el mantenimiento y control de estabilidad y homogeneidad de ítems de intercomparación. AUDIOTEC ha seguido en todo momento los criterios de calidad exigidos por ENAC para el desarrollo de ejercicios de intercomparación acústica y teniendoestablecido en su sistema de calidad un programa de control de infraestructuras e ítems que garantiza que los los laboratorios participantes lo hagan en igualdad de condiciones, garantizando la logística adecuada para la calidad del ejercicio.

En este apartado se exponen algunos ejemplos de la operativa de control y mantenimiento de ítems empleados en una intercomparación reciente dirigidas a laboratorios de ensayos acústicos “in situ” para alcances de las normas más habituales en el sector de la acústica ambiental y de la edificación (UNE EN ISO 16283-1:2014, UNE EN ISO 140-4:1999, UNE EN ISO 140-5:1999, UNE EN ISO 140-7:1999, UNE EN ISO 3382-2:2008, UNE EN ISO 3746:2011, RD 1367/2007_ruidos actividades, RD 1367/2007_ruidos infraestructuras viarias, RD 1367/2007_vibraciones).

### 4.1. Selección Preliminar de Las Infraestructuras y recintos adecuados.

En este caso AUDIOTEC ha proporcionado unas instalaciones con uso exclusivo para el desarrollo de la intercomparación en las que se cumplen todos los requisitos de calidad y facilidad para los Laboratorios participantes, ya que los recintos se encuentran muy próximos o colindantes entre sí y no están influenciados por otras actividades o focos sonoros que pudieran existir en el entorno, lo cual resultan adecuadas para poder llevar a cabo los ensayos ofertados. Así mismo, estos recintos están dispuestos y amueblados para cumplir con los requisitos normativos correspondientes a la norma de ensayo que corresponda.
Por ejemplo, en las instalaciones existen recintos colindantes vertical y horizontalmente, una fachada orientada a una autovía de elevado tráfico, una zona exterior para ensayos de niveles sonoros en exteriores y aislamiento de fachadas, etc. Todo esto nos permite cumplir con los requisitos que exige la normativa de referencia para cada tipo de ensayo y que las condiciones de los recintos resulten óptimas para el desarrollo de los ensayos.

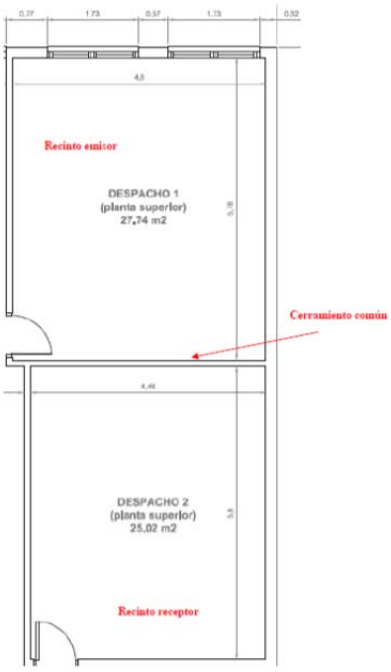



*Fig. 1. Ejemplos de ítems (recintos) empleados para ensayos según UNE EN ISO 140-4,*

### 4.2. Preparación, Chequeo y Mantenimiento de condiciones de Ítems.

Previamente y durante todo el ejercicio de la intercomparación, se ha llevado a cabo un control con chequeos previos y periódicos de los ítems y las condiciones, tanto meteorológicas como del entorno, para garantizar la estabilidad y homogeneidad para todos los participantes.
Para ello se han creado unas fichas de chequeo donde queda reflejada toda la información para su evaluación y validación.

**4.3. Realización de chequeos de niveles sonoros y de vibraciones previos y durante el ejercicio.**

Como parte del control y mantenimiento de ítems, se definen unos puntos de chequeo para los ensayos de niveles sonoros y vibraciones según el RD1367/2007, en los que se realizan las comprobaciones iniciales y previas a la participación de cada laboratorio para garantizar que todos los participantes realizan los ensayos en las mismas condiciones.




*Fig. 2. Puntos de chequeo de niveles sonoros y vibraciones*

**4.4. Ensayos iniciales, periódicos y finales para cada alcance ofertado.**

En los últimos ejercicios de intercomparación promovidos por Aecor, AUDIOTEC ha llevado a cabo para cada uno de los alcances una serie de ensayos iniciales, periódicos y finales que permiten evaluar y controlar la controlar la invariabilidad y estabilidad del ítem. Estos resultados se contrastan con los resultados iniciales para su validación y conformidad del ítem para ser utilizado por los laboratorios participantes.

**Objeto:** Ensayos periódicos de items intercomparación 2014.
**Lugar:** Instalacior
**Recinto emisor:**
coincidente sobre
**Recinto receptor**
**Fecha:** Mayo de

**TIPO DE ENSAYO: Aislamiento acústico de suelos a ruido de impacto según UNE EN ISO 140-7.**

| Frec (Hz) | Valor promedio inicial L'nT (dB) | Incertidumbre expandida U (dB) | Ensayo Mayo L'nT (dB) | Conformidad de ensayo |
|---|---|---|---|---|
| 100 | [redacted] | [redacted] | [redacted] | OK |
| 125 | | | | OK |
| 160 | | | | OK |
| 200 | | | | OK |
| 250 | | | | OK |
| 315 | | | | OK |
| 400 | | | | OK |
| 500 | | | | OK |
| 630 | | | | OK |
| 800 | | | | OK |
| 1000 | | | | OK |
| 1250 | | | | OK |
| 1600 | | | | OK |
| 2000 | | | | OK |
| 2500 | | | | OK |
| 3150 | | | | OK |
| 4000 | | | | OK |
| 5000 | | | | OK |
| L'nT,w según UNE EN ISO 717-2 (dB): | | | | OK |
| CI,100-2500: | | | | |

*Fig. 3. Ejemplo de ficha de control de resultados de un tipo de ensayo (UNE EN ISO 140-7).*

**4.5. Asistencia técnica y apoyo a los laboratorios participantes en lo concerniente a las condiciones de ensayo y requisitos comunes para todos los participantes.**

El equipo técnico de logística de AUDIOTEC, además de recepcionar a los laboratorios a su llegada, realiza, entre otras, las siguientes funciones:

- Controlar el acceso a las instalaciones únicamente del laboratorio participante para evitar la contaminación cruzada (activación de alarma, apertura y cierre de puertas, …).
- Controlar que se cumplen las condiciones ambientales durante el proceso de toma de datos mediante chequeos previos y posteriores.
- Controlar que los ítems mantienen las mismas características que han tenido el resto de laboratorios (chequeo de ítems con carácter previo y posterior a la participación del laboratorio).
- Resolución de cualquier duda o incidencia que pueda ser comunicada por el laboratorio.

## 5. CONCLUSIONES.

- Para poder desarrollar una intercomparación de calidad, se hace primordial, que tanto los ítems de ensayo, como las condiciones predeterminadas establecidas para dichos ensayos estén controlados y se mantengan en las mismas condiciones para todos los laboratorios para garantizar el correcto desarrollo del ejercicio.
- El poder llevar a cabo dicho control y mantenimiento requiere establecer una serie de actuaciones o técnicas previamente y durante todo el ejercicio que permitan a todos los laboratorios participar en igualdad de condiciones, como chequear condiciones ambientales, chequear los ítems de ensayo, realizar ensayos periódicos para verificar la invariabilidad del comportamiento acústico del ítem,….
- Por tanto, se hace imprescindible, que el proveedor de intercomparaciones disponga durante todo el ejercicio de un proveedor de logística cualificado que lleve a cabo todos esos controles que garanticen la homogeneidad y estabilidad de las infraestructuras y los ítems de ensayo y su entorno, servicios que ofrece AUDIOTEC.

## 6. BIBLIOGRAFÍA


- UNE EN ISO 17043:2010. “Evaluación de la conformidad. Requisitos generales de los ensayos de aptitud”.
- G-ENAC-14. “Guía sobre la participación en programas de intercomparaciones”.
- CGA-ENAC-PPI. “Criterios Generales de Acreditación de proveedores de Programas de intercomparaciones según la UNE 66543-1 y la Guía ILAC G-13”.
- Selection, Use and Interpretation of Profiency Testing Schemes. EURACHEM 2nd Edition 2011.
- ILAC-P9:11/2010 “ILAC Policy for Participation in Proficiency Testing Activities”.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA MEDIDA DEL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS A BAJA FRECUENCIA: ESTUDIO PRELIMINAR

PACS: 43.55.+p

**David K. Anthony[1], Francisco Simón[2]**
DAEND – Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
c/ Serrano 144
28006 Madrid, Spain.
Tel: +34 91 561 8806

E-mail: iaca344@ia.cetef.csic.es[1] , f.simon@csic.es[2]

**Resumen**
Actualmente se está interesado en la caracterización del aislamiento acústico de salas en el rango de la baja frecuencia. Esta caracterización se encuentra con problemas derivados de la carencia de difusión y otros parámetros que hacen que se pierda la capacidad de aplicar los modelos de alta frecuencia habituales. Sin embargo, dado que estos modelos son muy prácticos y están muy bien especificados interesa encontrar la manera de adaptarlos introduciendo modificaciones que permitan su uso en condiciones fiables. En este trabajo se un algoritmo de recocido simulado en la búsqueda de posiciones de medida óptimas con respecto al campo sonoro en los recintos. Se tienen en cuenta no solo la distribución espacial de los puntos de medida sino también el rango de dimensiones de los recintos de medida.

**Palabras-clave:** transmisión acústica ; baja frecuencia ; optimización numérica ; recocido simulado

**Abstract**
Currently there is interest in characterizing the acoustic insulation of rooms at low frequencies. This presents difficulties due to the lack of diffusion among other problems that reduce the sufficiency of common high-frequency models. However, given that these models are practical and well-defined it would be fruitful to adapt them to allow their use in a reliable way. Here, a simulated annealing algorithm is applied in order to find optimum measurement positions for the sound field within rooms, specifically considering the distribution of the measurement points and variability in the dimensions of the room under measurement.

**Keywords:** acoustic transmission, low frequency, numerical optimization, simulated annealing

## 1. Introducción

En la actualidad los métodos de medida utilizados para la caracterización acústica de las prestaciones de los edificios y de los elementos constructivos se basan en la medición del nivel de presión acústica en los recintos. Estos métodos (por ejemplo normas de medida ISO 10140 o ISO 16283) se basan en la relación entre la presión sonora de un campo acústico difuso y la potencia acústica de la fuente sonora que lo causa. Para el rango de frecuencias habitual de interés y para volúmenes de recinto superiores a 50 $m^3$, es razonable suponer la existencia de

este campo acústico. Sin embargo para frecuencias o volúmenes de recinto inferiores la aproximación de alta frecuencia en la que se basa el unos de campos difusos ya no se cumple y, como consecuencia, entre otras cosas el campo acústico ya no es homogéneo en todo el recinto, por lo que las directrices ofrecidas en las normas de medida antes citadas (y casi cualquier otra actual) pueden presentar divergencias respecto de los valores reales de niveles de presión medio en los recintos a esas bajas frecuencias.

En recintos pequeños la dimensión menor del recinto suele ser del orden o incluso inferior que el valor de las longitudes de onda involucradas. Además, su pequeño tamaño y su mobiliario hacen que no se pueda suponer que la probabilidad de que el sonido incidente que cada punto del recinto sea independiente de la dirección de incidencia. Todo ello explica porqué no puede existir campo difuso y los procedimientos habituales no pueden ser utilizados. Este problema no es nuevo y ha sido estudiado extensamente [1,2,3]. En su estudio surgen dos problemas principales, uno es que la respuesta está dominada por los modos de la sala debido a que su densidad modal es muy baja y otro que la relación entre el nivel de presión media en el recinto no tiene por que tener la misma relación con la potencia incidente sobre la pared medianera que la que tiene un campo difuso.

Debido a que el formalismo utilizado hasta ahora a demostrado ser muy práctico, tanto como los procedimientos de medida derivados de él, la línea de trabajo principal intenta adaptar los formalismos existentes a la nueva situación. Se buscan configuraciones que permitan estimar el valor medio del campo sonoro en el recinto para la nueva situación en la que se sabe que éste no es homogéneo en todo su interior. En la bibliografía sobre este tema se puede encontrar como es esperable que en los rincones del recinto los valores sean consistentemente altos a la vez que próximos a ese valor medio que se busca. Sin embargo cuestiones prácticas desaconsejan su uso. Al final las últimas propuestas sugerían promediar los valores de nivel de presión acústica de los rincones con un promedio espacial del resto del recinto.

En el presente trabajo se presenta un estudio preliminar en el que se estudian aquellas configuraciones de medida que ofrecen valoraciones del campo lo más homogéneas posible. De esta forma se esperan localizar sesgos (si los hubiera) sobre las zonas del recinto más favorables para la caracterización del campo a baja frecuencia. En el estudio se incluyen los rincones de forma que se pueda valorar la importancia de su inclusión en los procedimientos de medida o la posible elaboración de alternativas.

El estudio se basa en el uso de un algoritmo de recocido simulado para la búsqueda de los valores que minimizan la función objetivo que en nuestro caso será la colección de valores relativos de la energía acústica en las diferentes posiciones de medida de un ensayo. El estudio se realizará tanto para diferentes valores del número de posiciones de medida como para diferente número de posiciones de fuente.

## 2. Recocido simulado

El algoritmo de recocido simulado (SAA, [4]) (simulated annealing algorithm en inglés) es un algoritmo de búsqueda estocástico que se puede aplicar para encontrar soluciones óptimas, las cuales son aproximaciones a la solución óptima global. Se aplica cuando el problema abordado es demasiado alto computacionalmente para realizar una búsqueda exhaustiva y otros métodos como los basados en gradientes no son aplicables debido a la naturaleza de la superficie de búsqueda (por ejemplo si es multimodal y si tiene muchas soluciones óptimas locales).

El SAA pertenece a una familia de algoritmos de búsqueda que se basan en fenómenos reales (en este caso el enfriamiento lento de materiales) y se aplican cuando los métodos tradicionales no son adecuados. Otro algoritmo común en problemas de gran número de mínimos locales es el de un algoritmo genético (GA, genetic algorithm en inglés) [5], el cual es más complejo pero más completo ya que busca un conjunto de soluciones en paralelo. Sin embargo, para problemas combinatorios, como será nuestro caso, el GA no ofrece grandes ventajas (ver [6] como ejemplo).

En principio el funcionamiento de un SAA es sencillo. Se empieza con una solución inicial (generada aleatoriamente) y se evalúa el rendimiento de ésta. Luego se repite la siguiente en un bucle: se hace un cambio aleatorio a la solución actual y se evalúa su rendimiento. Si se produce una mejora en el rendimiento se acepta incondicionalmente la nueva solución como la solución actual, y se repite otro bucle. En caso contrario, se acepta la nueva solución como la actual con una probabilidad $p_{acc}$ o se mantiene la actual, y se repite otro bucle. El valor de $p_{acc}$ varia con el ensayo de optimización, se empieza con un valor de 0.5 y se acaba con un valor de 0.025 siguiendo una función exponencial con exponente negativo. Esto permite que se explore la superficie de búsqueda en diferentes puntos no correlativos de ninguna manera al principio del ensayo, al tiempo que se concentra mucho en las mejoras al final (búsqueda local) del mismo. La mejor solución encontrada durante el ensayo se usa como solución óptima. Debido la naturaleza estocástica de un SAA, éste se repite un conjunto dado de veces.

En los resultados presentados aquí se usaron un número de 2000 evaluaciones. Ensayos previos mostraron que con este número se conseguía un grado de convergencia suficiente. Para cada escenario considerado se realizaron 10 optimizaciones de SAA.

## 3. Optimización

Se usan 16 salas con un volumen de 80m$^3$, y con sus dimensiones ($L_x$, $L_y$, $L_z$) según las relaciones $L_x$:$L_y$ y $L_y$:$L_z$ con valores $\{1{:}1.121,\ 1{:}1.242,\ 1{:}1.362,\ 1{:}1.483\}$.

Las posiciones candidatas de los micrófonos se definen mediante una malla de 5x5x5 con una distancia entre posiciones a lo largo de cada dimensión con un factor de 0.15 de la longitud de la sala en este sentido, como se muestra en la figura 1a. Además, en algunos casos se utilizaron posiciones adicionales de micrófono directamente en las esquinas de las salas, o en alejadas de ellas por un factor de 0.08 de la longitud de la sala en el eje correspondiente. Las posiciones candidatas de las fuentes se definen por una malla de 2x5x5 con una distancia entre posiciones a lo largo de cada dimensión con un factor de 0.2 y con un factor de 0.1 en el eje $z$, como se muestra en la figura 1b.

La tabla 1 resume los tres casos de posiciones candidatas de micrófonos que se consideran y los códigos que se usan abajo para hacer referencia a ellos.

La solución de las posiciones de medida y las fuentes (en algunos casos) están representadas por una cadena de números, donde cada número representa la posición de uno de los micrófonos en la solución. Las posiciones de las fuentes también son representadas y añadidas a la cadena de micrófonos. Los cambios aleatorios que se realizan en el SAA consisten en reemplazar solo un elemento (que representa un micrófono o una fuente) en la cadena.

| Código | Numero de posiciones de micrófonos | Resumen |
|---|---|---|
| NC | 125 | Malla de posiciones candidatas de 5x5x5 |
| C00 | 133 | Caso NC más 8 micrófonos justo en las esquinas de las salas |
| C08 | 133 | Como C08, pero los posiciones en las esquinas se desplazan un factor de 0.08 hacia el interior de la sala |

Tabla 1 . Resumen de los tres casos de posición de medida y los códigos que hacen referencia a ellos.

## 4. Función de coste

El valor que se usó como base de la optimización es el determinado por una función de coste. En este caso se representa la variabilidad en las señales medidas por los micrófonos bajo la variación de las dimensiones del recinto, para cada solución evaluada.

Primero, se evalúa la presión a un punto, $\mathbf{r}$, en una sala debido a una fuente ubicada en $\mathbf{s}$ :

$$p(\mathbf{r},\mathbf{s},\omega) = i\frac{\omega Q \rho c^2}{V}\sum_n \frac{\psi_n(\mathbf{r})\psi_n(\mathbf{s})}{\Lambda_n\left(\omega_n^2 - \omega^2 - 2i\delta_n\omega_n\right)}, \quad (1)$$

donde $\omega$ es la frecuencia angular, $Q$ la fuerza de la fuente, $c$ la velocidad del sonido, $\rho$ la densidad de aire, $V$ el volumen de la sala, $n$ es el índice de modo, $\omega_n$ la frecuencia natural de modo, $\Lambda_n$ es un factor de normalización, $\delta_n$ el factor de amortiguamiento modal, y $\psi_n$ son las funciones formas de modo para la sala.

Cada solución especifica las posiciones de los micrófonos y de las fuentes (donde existan). Siguiendo normativas vigentes (por ejemplo [7,8]), se mide la presión cuadrada en bandas de octavos de frecuencias, $<\omega>_i$. Aquí se usan las octavos con frecuencias centrales: {20, 40, 80, 160, 315} Hz, cada una se calcula usando más de 300 puntos de frecuencia. Se calcula una función, $x$, que representa la presión cuadrada para cada banda de frecuencia, promediada sobre todos los micrófonos y fuentes especificadas en una solución evaluada:

$$x(a,i) = \overline{p^2\left(\mathrm{r}_j, \mathrm{s}_k, \langle\omega\rangle_i, a\right)}_{j,k}, \quad (2)$$

La meta de la optimización es encontrar un conjunto de micrófonos (y fuentes) tal que el coeficiente de variación en x de sus bandas de frecuencias que mínimo. Si la solución global es $J_o$, su valor se define como:

$$J_o = \min_{j,k}\max_i\left(\frac{\hat{\sigma}\left(x(a,i)\right)_a}{\overline{\left(x(a,i)\right)_a}}\right), \quad (3)$$

En la práctica, la optimización es una de tipo min-max: minimizar la máxima variación de la presión cuadrática medida en las bandas de frecuencia, con las posiciones de los micrófonos y fuentes como variables de la optimización.

## 5. Resultados

Se investigaron escenarios para números de micrófonos, $m$, de {3, 5, 7}, y numero de fuentes, $s$, de {0, 1, 2}. Cuando $s$ = 0, la forma del modo de la fuente, $\psi_n$ (s) in la ec. (1), es el valor unidad. El motivo para utilizar $s$ = 0 es optimizar la posición de los micrófonos independientemente de la posición de la fuente. En la realidad podría representar un fuente de tipo bocina en el origen de la sala.

En la tabla 2 se muestra el número de combinaciones que existen para la tarea de optimización para escenarios con $s$ = 0. Se observa que con $s$ = 1 el numero de combinaciones multiplica los valores dados por 50, y para $s$ = 2 se lo multiplica por 49x50.

| Numero de micrófonos ($m$) | Numero de combinaciones | Tiempo de eval. [días] (para 1s / eval.) |
|---|---|---|
| 3 | 317,750 | 3.7 |
| 5 | $2.35 \times 10^{8}$ | 2714 |
| 7 | $7.97 \times 10^{10}$ | $9.25 \times 10^{5}$ |

Tabla 2. Numero de combinaciones y el tiempo de evaluación en días (para evaluaciones de un segundo) para escenarios con $s$ = 0 y 133 posiciones candidatos de micrófonos.

En el escenario ($m$ = 3, $s$ = 0) es factible usar una búsqueda exhaustiva para la obtención de la solución. Esto permite evaluar el rendimiento del SAA. En la figura 2, se muestra la distribución de resultados de la búsqueda exhaustiva para este escenario y para los tres casos de posiciones de micrófono (NC, C00, C08 – ver la tabla 1). Además, se muestran los resultados del SAA mediante puntos, en cada caso. Se ve que aunque hay una variación pequeña entre los resultados de cada optimización en todos los casos se encontraron soluciones muy cerca de la solución global. Cada uno de ellas cae en el percentil $10^{-5}$ (o inferior) de la distribución correspondiente, y se consiguió mediante 2,000 evaluaciones, dónde la búsqueda exhaustiva llevo al menos 150 veces más evaluaciones. Se ve que como el número de micrófonos aumenta mucho esta diferencia.

Para analizar los resultados de las optimizaciones del SAA de todos los casos que se consideraron, se dibujan los valores promedio de cada optimización junto a sus valores individuales. Esto se muestra en la figura 3 donde se grafican los resultados con $m$ y $s$ como el variable independiente. Además, para los casos C00 y C08, se muestran el número de veces que micrófonos con posiciones en las esquinas aparecen en las soluciones.

En la figura 3a se puede observar que, en general, la variabilidad de la función de coste $J$ (el valor medio promediado de $p^2$) disminuye con el aumento del número micrófonos. Esto se nota en la media de las 10 evaluaciones de cada caso, y observando los valores individuales en cada caso se nota que además son estadísticamente diferentes para los escenarios de $s$ = 0. Para $s$ = {1,2} la diferencia disminuye cuando el número de fuentes aumenta.

Se observa que para $s$ = 0 todas las soluciones especifican un micrófono en una posición de esquina (para los casos de C00 y C08). Cuando $s$ = 1, las posiciones de esquina también aparecen menos, pero no en todas las soluciones. Y con $s$ = 2, las esquinas aparecen menos que en el caso anterior. Para los escenarios de $s$ = {1,2}, si el algoritmo da varias soluciones con puntos en las esquinas utiliza más los puntos inscritos en ellas (C00) más que los excéntricos (C08).

La figura 3b representa los mismos resultados de otra manera. Aquí es fácil ver, en general, que es mejor usar escenarios de o bien $s$ = 0 o bien $s$ = 2, aunque para $s$ = 0 y el caso NC no hay ventaja sobre los casos C00 y C08.

## 6. Conclusiones

Se ha estudiado de forma preliminar las soluciones óptimas para las posiciones de micrófonos (puntos de medida) y las fuentes para reducir la variabilidad en la estimación del campo acústico a baja frecuencia, cuando hay variabilidad en las dimensiones de la sala. Esto ha permitido identificar algunas tendencias en las ubicaciones de micrófonos y fuentes. En particular, se mostró el beneficio de ubicar éstos en las esquinas, y bajo qué condiciones, y cuál es el número de fuentes óptimo.

El problema abordado es complejo y de forma altamente combinatoria. Se ha justificado el uso de algoritmos de recocido simulado (simulated annealing algorithm, SAA), y el estudio de una versión reducido del problema ha permitido evaluar el rendimiento del SAA.

## Agradecimientos

El primer autor colaboró en este trabajo durante un Permiso de Estancia en el ITEFI-CSIC.

## Referencias

[1] W. Kropp, A. Pietrzyk, and T. Kihlman, “On the meaning of the sound reduction index at low frequencies”, Acta Acustica 2, 379–392 (1994).

[2] C. Simmons, “Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. comparison of available methods and standards with respect to microphone positions”, Acta Acustica united with Acustica 85, 88–100 (1999).

[3] C. Hopkins and P. Turner, “Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies”, Applied Acoustics 66, 1339 – 1382 (2005)

[4] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P.Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”, Science 220, 671-680 (1983)

[5] D.E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning”, Cambridge MA: Addison-Wesley (1989)

[6] H.K. Baek, S.J. Elliott, “Natural Algorithms for choosing Source Locations in Active Control Systems”, Journal of Sound and Vibration, 186(2), 245-267 (1995)

[7] ISO 10140:2010, “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parts 1 to 5”, (2010)

[8] ISO/DIS 16283-1, “Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation”, (2012)

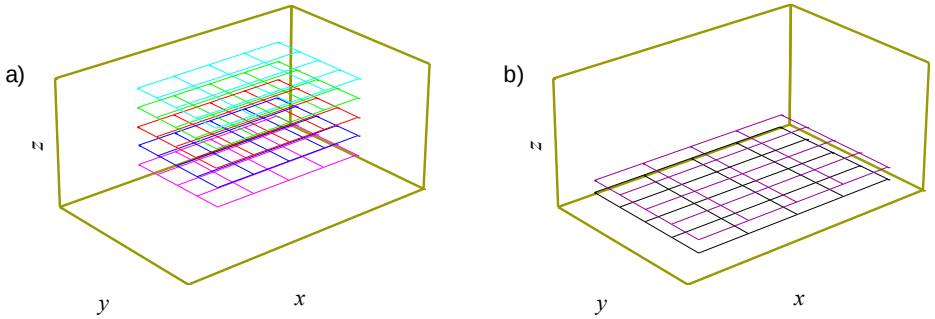



Figura 1. Mallas de las posiciones candidatas para los micrófonos (a) y las fuentes (b).

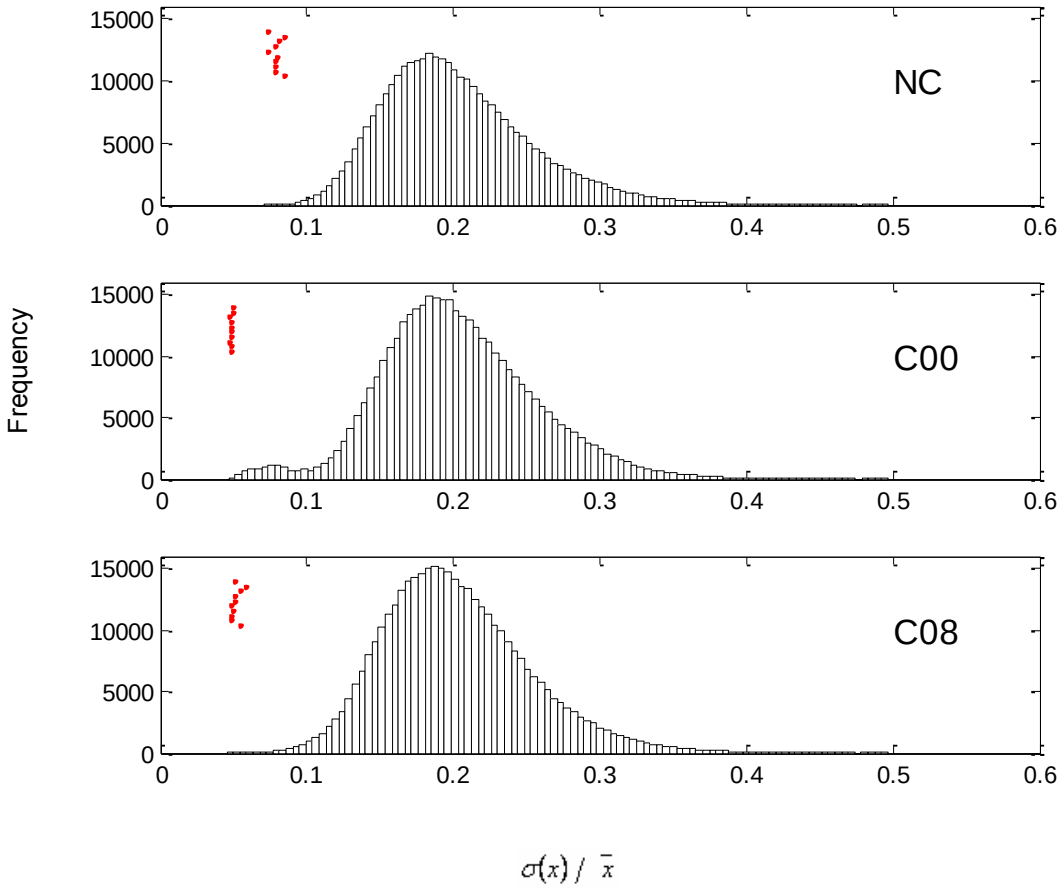



Figura 2. Histogramas para el escenario $m$ = 3 y $s$ = 0 para los casos NC, C00 y C08, según descripción en el texto. También se muestran los resultados de los 10 ensayos del SAA para cada caso.

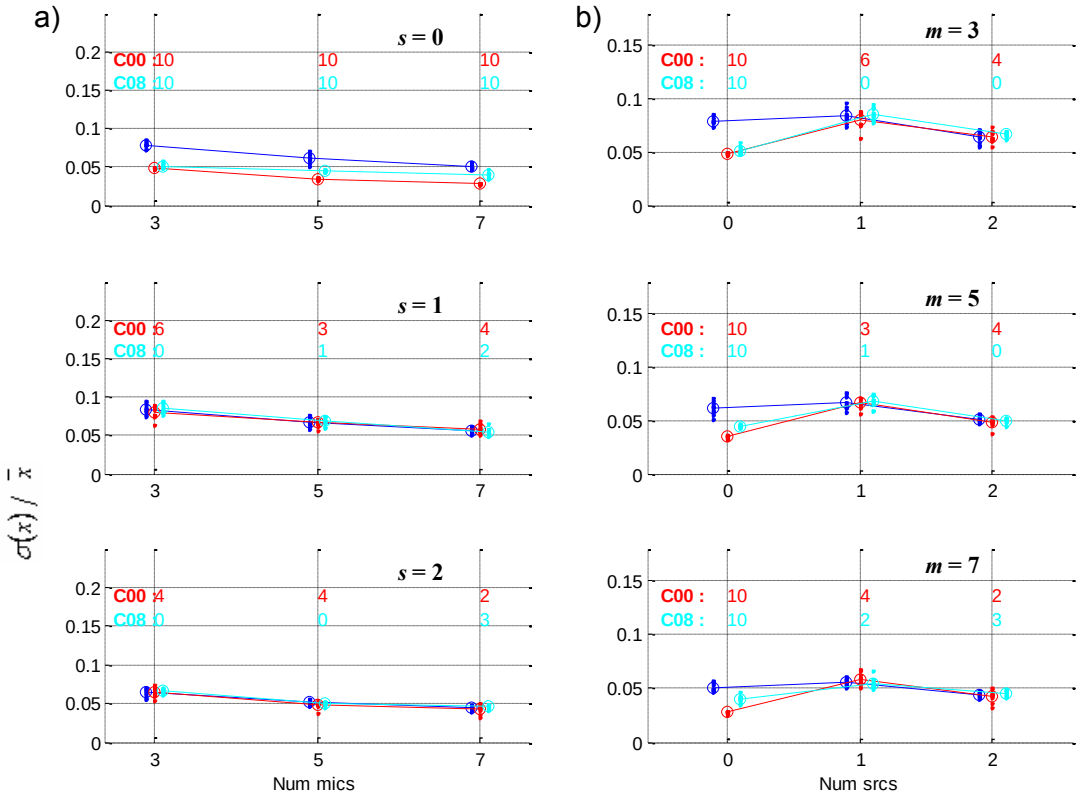



Figura 3. Los resultados de los ensayos de las optimizaciones, dibujados contra a) el número de micrófonos ($m$) y, b) el número de fuentes ($s$). También se muestran el número de fuentes ubicadas en las esquinas para los casos C00 y C08. (Clave: NC ——— ; C00 ——— ; C08 ——— )

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DO ALARGAMENTO DA GAMA DE FREQUÊNCIAS NA DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE ISOLAMENTO SONORO E NA RESPETIVA INCERTEZA

PACS: 43.15.+s,43.55.Rg

Diogo M. R. Mateus; Julieta M. P. António
Departamento de Engenharia Civil, FCT da Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
Tel. +351-239797196
Fax +351-239797190
diogo@dec.uc.pt ; julieta@dec.uc.pt

## ABSTRACT

Sound insulation descriptors have traditionally been calculated from the sound insulation measured in 1/3 octave bands, between 100Hz and 3150Hz. During the last years the technical comittee ISO/TC 43/SC 2 made efforts to develop standards to calculate sound insulation indices in 1/3 octave bands between 50Hz and 5000Hz. In order to contribute to this discussion numerous measurements of sound insulation have been performed in situ, from which the influence of including low frequency bands in the calculation of sound insulation descriptors and in the associated uncertainty has been assessed.

## RESUMO

Os índices de isolamento têm sido tradicionalmente calculados a partir do isolamento sonoro, medido em bandas de 1/3 de oitava, entre 100Hz e 3150Hz. Nos últimos anos, a ISO/TC 43/SC 2, trabalhou no sentido de desenvolver normas para o cálculo dos índices de isolamento em bandas de 1/3 de oitava, entre os 50Hz e os 5000Hz. No sentido de contribuir para a discussão desse tema, foram realizadas inúmeras medições de isolamento sonoro *in situ*, a partir das quais se avaliou a influência da inclusão de bandas de baixas frequências no cálculo dos índices de isolamento sonoro e da incerteza associada.

## 1. INTRODUÇÃO

A regulamentação existente em vigor em Portugal, no que respeita às condições acústicas, é apresentada no Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo Decreto Lei nº 9/2007. Este regulamento define de uma forma global uma política de prevenção e combate ao ruído, tendo em vista a salvaguarda da saúde e o bem-estar das populações. No que se refere aos requisitos técnico-funcionais dos edifícios, encontra-se atualmente em vigor o Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE, aprovado pelo Dec. Lei nº 129/2002 de 11 de Maio, com a nova redação dada pelo Dec. Lei nº 96/2008 de 9 de Junho).

Com vista a averiguar o cumprimento do RRAE [1] são efetuadas medições acústicas, geralmente em bandas de terços de oitava, entre os 100 Hz e os 3150 Hz. A partir destas

medições são determinados os índices de isolamento, através normas ISO 717-1 [2] e ISO 717-2 [3], que são comparados com os valores dos requisitos legais em vigor.

Nos últimos anos, a ISO/TC 43/SC 2, trabalhou no sentido de desenvolver normas para o cálculo dos índices de isolamento em bandas de 1/3 de oitava, entre os 50 Hz e os 5000 Hz. A questão da integração de bandas de baixa frequência, no cálculo dos índices de isolamento, não merecia o consenso de todos os investigadores, tendo dado origem a alguns trabalhos de investigação sobre as consequências desta adoção. Entretanto, as normas que estavam em desenvolvimento foram eliminadas. Contudo, e sobretudo para elementos de compartimentação leves em edifícios, com forte tradição em muitos países e em crescimento acentuado em Portugal, a contribuição das baixas frequências pode ser muito relevante, em particular no isolamento a sons aéreos [4]. Deste modo, pretende-se com o presente trabalho avaliar a influência da inclusão de bandas de baixa frequência no valor dos índices de isolamento e na respetiva incerteza associada ao ensaio. A primeira parte do trabalho é baseada num conjunto alargado de ensaios de medições in situ, cujos resultados principais já foram apresentados em comunicação anterior, no Tecniacústica 2013 [5], e que agora se explora mais a vertente das incertezas associadas a esses ensaios.

O referido conjunto de resultados de ensaios reportam-se a medições de isolamento de sons aéreos e de sons de percussão. Para o isolamento a sons aéreos, selecionaram-se situações em que o elemento de separação direto é parede ou pavimento. No caso das medições de isolamento sonoro a sons de percussão, selecionaram-se situações de transmissão lateral, descendente e ascendente. Para o efeito, serão apresentados gráficos, por grupos de elementos construtivos de separação, onde se compara o valor do índice regulamentar atual, com os valores do índice regulamentar mais o fator de adaptação calculado a partir dos 100 Hz e do índice mais o fator de adaptação calculado a partir dos 50 Hz. Os descritores (índices de isolamento constituídos por um valor único) considerados foram os seguintes: $D_{nT,w}$, $D_{nT,w}+C$, $D_{nT,w}+C_{50-5000}$, $D_{nT,w}+Ctr$, $D_{nT,w}+Ctr_{50-5000}$, no caso de isolamento a sons aéreos; e de $L'_{nT,w}$; $L'_{nT,w}+CI$, $L'_{nT,w}+CI_{50-2500}$, no caso da transmissão de sons de percussão. A incerteza dos ensaios foi determinada para os anteriores descritores que incluem os termos de adaptação ($D_{nT,w}+C$, $D_{nT,w}+C_{50-5000}$, $D_{nT,w}+Ctr$, $D_{nT,w}+Ctr_{50-5000}$, $L'_{nT,w}+CI$, $L'_{nT,w}+CI_{50-2500}$).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Dados de medição e determinação dos índices de isolamento

Os valores dos índices de isolamento que serão apresentados no ponto seguinte resultam de um conjunto alargado de medições *in situ*. Os resultados são agrupados em dois grandes grupos: um relativo a isolamento a sons aéreos, organizado em função do elemento construtivo de separação direta,; e outro de transmissão de sons de percussão, organizado em função do elemento percutido e do caminho de transmissão. A constituição exata, em termos de espessuras não é conhecida, sabendo-se apenas quais são os tipos de elementos/revestimentos. Nas Tabelas 1 e 2 descrevem-se os vários casos analisados.

As medições de isolamento a sons aéreos foram realizadas segundo a anterior norma NP EN ISO 140-4, que correspondia à norma em vigor aquando da realização dos ensaios (anos 2011 a 2013). Entretanto esta norma já foi anulada, encontrando-se atualmente em vigor a norma NP EN ISO 16283-1:2014. Nas medições de isolamento a sons de percussão foi utilizada como referência a norma NP EN ISO 140-7, que se encontra ainda em vigor. Os índices de isolamento e respetivos termos de adaptação foram obtidos através do procedimento indicado nas normas NP EN ISO 717-1 e NP EN ISO 717-2.

Tabela 1. Tipos de elementos de separação direta (pavimentos ou paredes) nos ensaios de isolamento a sons aéreos

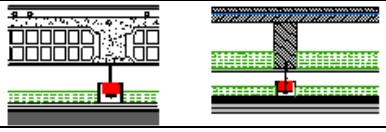
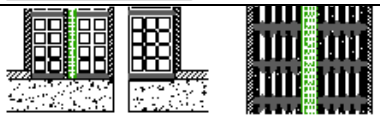
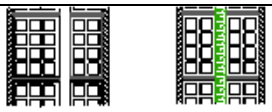
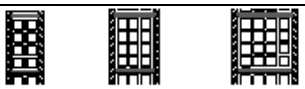
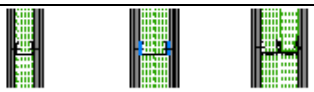
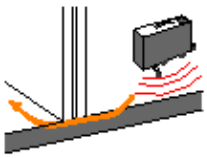
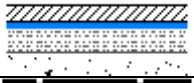
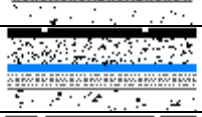
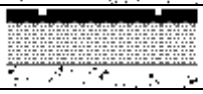
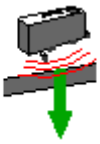
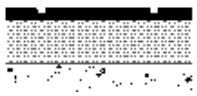
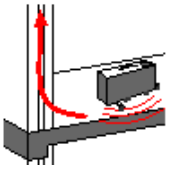
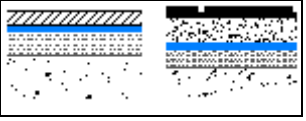
| Grupo | Tipo de elemento de separação direto | Nº do ensaio | Esquema da solução |
|---|---|---|---|
| I | Lajes em betão com tetos falsos ou pavimentos aligeirados multicamadas | 1-5 |  |
| II | Lajes correntes em betão armado | 6-10 |  |
| III | Paredes de alvenaria pesadas (com 2 a 4 panos) de elevado desempenho (sem continuidade dos elementos marginais) | 11-20 |  |
| IV | Paredes correntes de alvenaria dupla | 21-29 |  |
| V | Paredes correntes de alvenaria simples | 30-34 |  |
| VI | Divisórias leves à base de gesso cartonado | 35-40 |  |

Tabela 2. Tipos de pavimentos percutidos, para diferentes caminhos de transmissão, nos ensaios de isolamento a sons de percussão

| Grupo | Tipo de elemento de separação direto | Direção da transmissão sonora | Nº do ensaio | Esquema da solução |
|---|---|---|---|---|
| VII | Lajes em betão armado revestidas com pavimentos flutuantes |  Horizontal | 41-48 |  |
| VIII | Lajes em betão armado com revestimento cerâmico sobre betonilha flutuante | | 49-59 |  |
| IX | Lajes em betão armado e com revestimento cerâmico rigidamente ligado | | 60-63 |  |
| X | Lajes em betão armado com pavimento flutuante em madeira ou com betonilha flutuante e revestimento cerâmico |  Vertical descendente | 64-71 |  |
| XI | Lajes em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado | | 72-75 |  |
| XII | Lajes em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado |  Vertical ascendente | 76-80 | |
| XIII | Lajes em betão armado com pavimento flutuante em madeira ou com betonilha flutuante e revestimento cerâmico | | 81-84 |  |

### 2.2 Cálculo da incerteza

Para o cálculo da incerteza foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: a dispersão de resultados, de acordo com o desvio padrão e número de repetições; a incerteza do sonómetro; e a incerteza do arredondamento. Numa primeira fase foram determinadas as

incertezas nos parâmetros $D_{nT}$ e $L'_{nT}$, para cada banda de frequência de 1/3 de oitava, seguindo o procedimento indicado no Guia RELACRE 22 [6]. Posteriormente, foi determinada a incerteza global do ensaio para o valor único correspondente ao índice de isolamento somado do termo de adaptação.

No caso do isolamento a sons aéreos foi considerada a "correlação positiva" [7], acrescentando a incerteza relativa ao arredondamento final no valor único. Considerando um fator de convergência com 95% de confiança igual a 1,96, a incerteza expandida para o valor único $X$ ($D_{nT,w}+C$, $D_{nT,w}+C_{50-5000}$, $D_{nT,w}+Ctr$ ou $D_{nT,w}+Ctr_{50-5000}$), é dada por:

$$\varepsilon(X)=1{,}96\times\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{10^{(L_i-D_{nT,i})/10}}{\sum_i 10^{(L_i-D_{nT,i})/10}}\right)u(D_{nT,i})\right]^2+u^2(rg)} \quad (1)$$

onde $i$ é o número da banda de 1/3 de oitava, $L$ é o nível do espetro de referência (ruído rosa ou ruído de tráfego urbano), $D_{nT}$ é a curva de isolamento sonoro padronizado a sons de condução aérea e $u(rg)$ é o valor de incerteza no arredondamento à unidade (0,3 dB).

Para a determinação da incerteza nos ensaios de isolamento a sons de percussão foi seguido um procedimento semelhante, com a determinação da incerteza por banda de frequência de 1/3 de oitava para o parâmetro $L'_{nT}$, e posterior cálculo da incerteza global associada ao valor único $Y$, que corresponde a $L'_{nT,w}+CI$ ou $L'_{nT,w}+CI_{50-2500}$, através da seguinte expressão:

$$\varepsilon(Y)=1{,}96\times\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{10^{(-15+L'_{nT,i})/10}}{\sum_i 10^{(-15+L'_{nT,i})/10}}\right)u(L'_{nT,i})\right]^2+u^2(rg)} \quad (2)$$

onde $i$ é o número da banda de 1/3 de oitava, $L'_{nT}$ é a curva de isolamento sonoro padronizado a sons de percussão e $u(rg)$ é o valor de incerteza no arredondamento (0,3 dB).

## 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 3.1 Isolamento a Sons Aéreos

Na Figura 1 apresentam-se os resultados de isolamento a sons aéreos, para os cinco descritores considerados, e o valor previsto para a incerteza, representado por "barras de erro", para os quatro descritores que incluem os termos de adaptação, para o grupo das lajes em betão com tetos falsos ou pavimentos aligeirados multicamadas (ensaios 1 a 5) e para o grupo das lajes correntes em betão armado (ensaios 6 a 10). De uma forma geral, a inclusão dos termos de adaptação conduz a uma redução no valor único de isolamento, em particular quando se considera o termo de adaptação obtido a partir do espectro de ruído de tráfego urbano, quer na situação sem inclusão da gama de baixas frequência ($Ctr$), quer sobretudo quando se incluí as baixas frequências ($Ctr_{50-5000}$). Tal como seria de esperar a penalização decorrente da inclusão das baixas frequências é mais penalizante no grupo das lajes com tetos falsos e dos pavimentos aligeirados com multicamadas (com maior índice $D_{nT,w}$, face à massa superficial desse pavimento). Verifica-se ainda um aumento do valor da incerteza com a inclusão das baixas frequências, em particular para estes últimos casos, com valores de $Ctr_{50-5000}$ mais penalizantes.

Na Figura 2 apresentam-se os resultados de isolamento a sons aéreos para os elementos do grupo III, correspondente às paredes de alvenaria pesadas de elevado desempenho. Na maior parte dos exemplos verifica-se que os valores apresentados são mais baixos quando se inclui a

contribuição das bandas de baixa frequência, em particular quando se trata da transmissão de ruído do tipo "tráfego" (exceto nos casos 12 e 16). Também se verifica um aumento da incerteza, tendencialmente acentuado no caso do espetro de ruído de tráfego, quando se inclui o alargamento às baixas frequências.

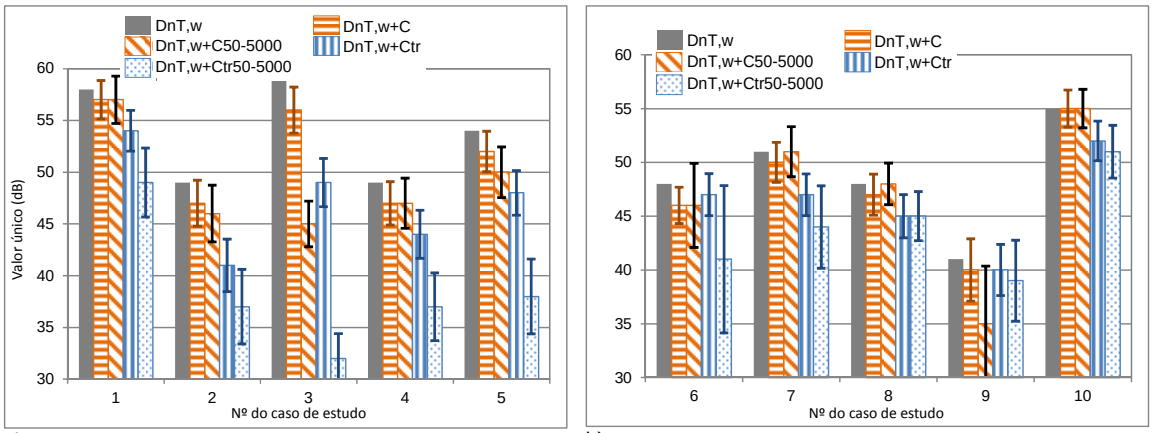



Figura 1 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por lajes: a) do grupo I; b) do grupo II.

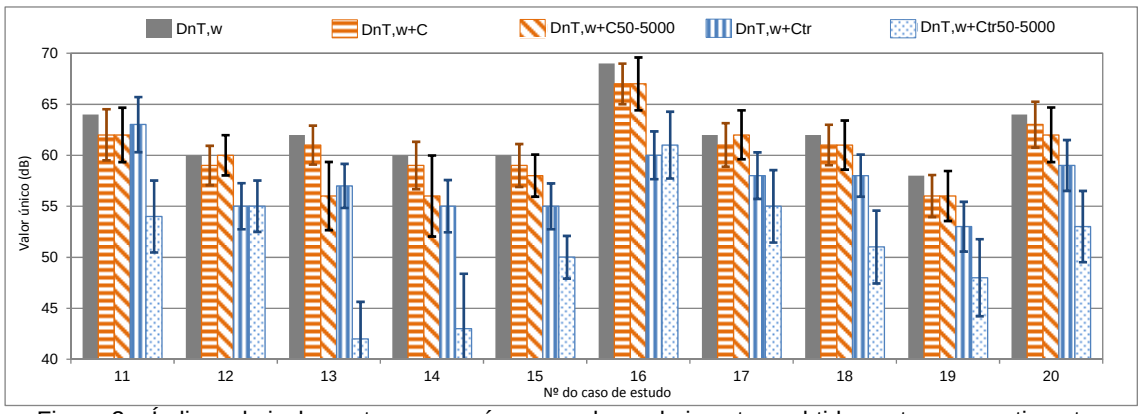



Figura 2 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes de alvenaria pesadas (grupo III).

As Figuras 3 e 4a contêm o mesmo tipo de resultados respetivamente para os elementos dos grupos IV e V (paredes correntes de alvenaria dupla e alvenaria simples). Nestes casos, a inclusão das baixas frequências tem também maior influência no que respeita à transmissão de ruído do tipo "tráfego", mas ainda assim menos relevante que nos grupos I e III.

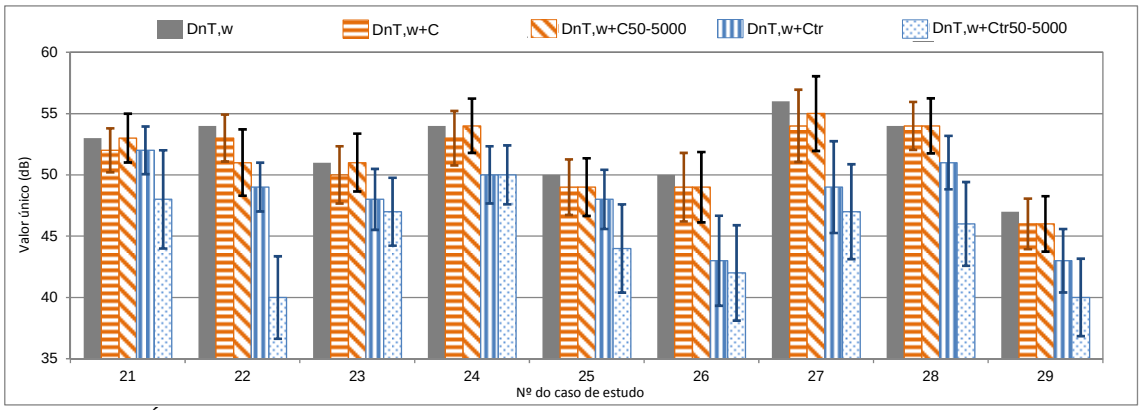



Figura 3 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes de alvenaria duplas correntes (grupo IV).

Na Figura 4b são apresentados os resultados de isolamento a sons aéreos e de incerteza para o grupo VI (divisórias leves). Neste caso, verifica-se uma tendência semelhante aos grupos I e III. Para este caso e anteriores é apresentado na Tabela 3 um resumo dos resultados médios.

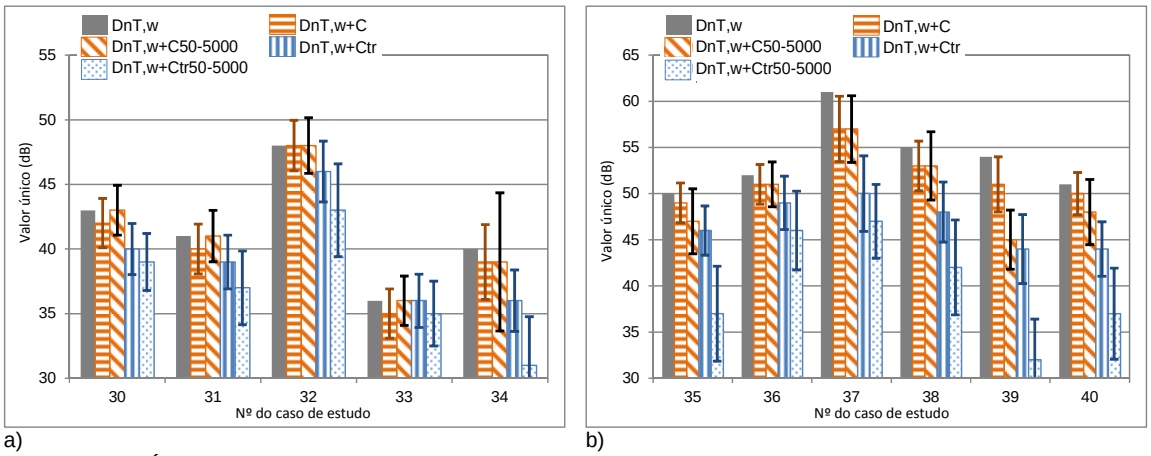



Figura 4 – Índices de isolamento a sons aéreos e valores de incerteza obtidos entre compartimentos separados por paredes: a) do grupo V (simples de alvenaria); b) grupo VI (aligeiradas).

Tabela 3. Valores médios dos descritores de isolamento a sons aéreos e da respetiva incerteza

| Nº do caso de estudo | Média | | Incerteza | | Média | | Incerteza | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $D_{nT,w}+C$ | $D_{nT,w}+C_{50\text{-}5000}$ | $D_{nT,w}+C$ | $D_{nT,w}+C_{50\text{-}5000}$ | $D_{nT,w}+Ctr$ | $D_{nT,w}+Ctr_{50\text{-}5000}$ | $D_{nT,w}+Ctr$ | $D_{nT,w}+Ctr_{50\text{-}5000}$ |
| 1-5 | 51.8 | 49.0 | 2.07 | 2.43 | 47.2 | 38.6 | 2.26 | 3.25 |
| 6-10 | 47.6 | 47.0 | 2.02 | 3.06 | 46.2 | 44.0 | 2.03 | 3.83 |
| 11-20 | 60.8 | 60.0 | 2.12 | 2.66 | 57.3 | 51.2 | 2.35 | 3.48 |
| 21-29 | 51.1 | 51.3 | 2.25 | 2.45 | 48.1 | 44.9 | 2.60 | 3.39 |
| 30-34 | 40.8 | 41.4 | 2.12 | 2.67 | 39.4 | 37.0 | 2.17 | 2.98 |
| 35-40 | 51.8 | 50.2 | 2.64 | 3.33 | 46.8 | 40.2 | 3.26 | 4.65 |

### 3.2 Isolamento a Sons de Percussão

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos para os casos de estudo incluídos no grupo VII (entre compartimentos do mesmo piso, com lajes revestidas com pavimentos flutuantes). Neste caso, a inclusão das baixas frequências não conduz a penalização nos resultados nem agrava a incerteza. A mesma conclusão pode ser estabelecida para os exemplos apresentados na Figura 6, referentes ao grupo VIII (compartimentos do mesmo piso e betonilha flutuante).

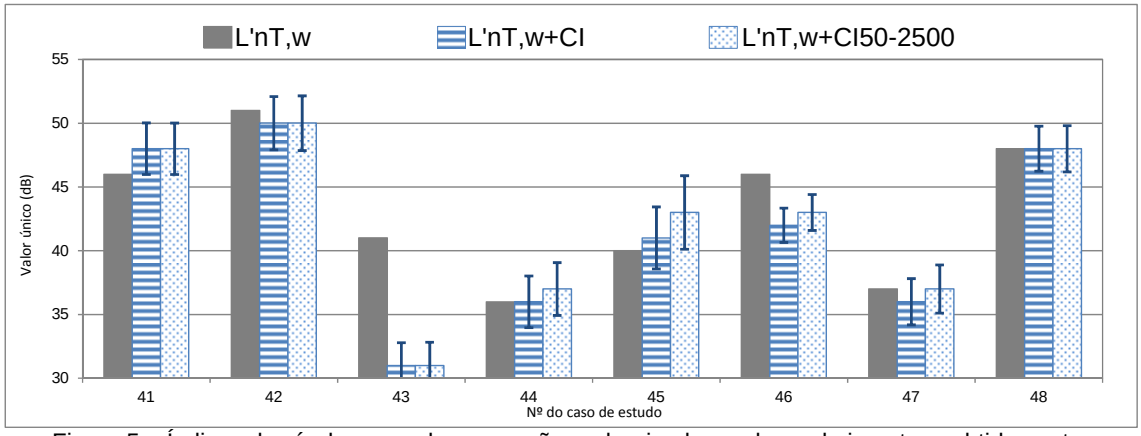



Figura 5 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza obtidos entre compartimentos do mesmo piso, com lajes de piso em betão armado e pavimento flutuante.

Na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos quando a laje de piso é em betão armado com revestimento cerâmico rigidamente ligado e a transmissão é lateral (grupo IX - Figura 7a)) e descendente (grupo XI - Figura 7b)). Nestes casos, de fraco desempenho, os termos de

adaptação são sempre muito negativos (entre -6 e -13 dB). Contudo, a inclusão das baixas frequências não conduz a alterações nos resultados finais nem na incerteza.

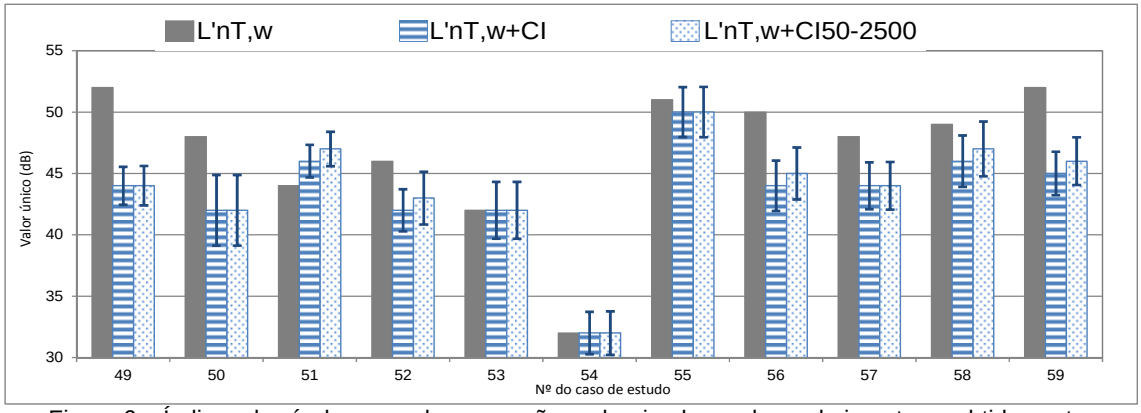
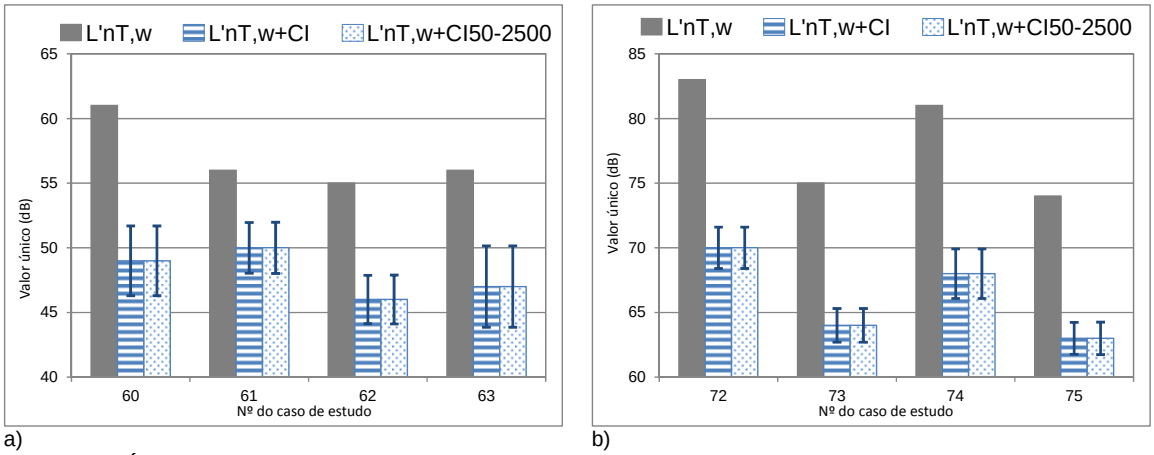



Figura 6 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos entre compartimentos do mesmo piso, com lajes de piso em betão armado e betonilha flutuante.

A Figura 8 apresenta os casos de estudo do grupo X (transmissão descendente, com pavimento flutuante ou betonilha flutuante). Na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos para os casos de estudo dos grupos XII e XIII, correspondentes à transmissão ascendente com lajes de piso em betão armado: a) com revestimento cerâmico rigidamente ligado; b) com e pavimento flutuante em madeira ou de betonilha flutuante. Nestes casos a inclusão de baixas frequências também não é relevante.




a) b)

Figura 7 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos com laje de piso em betão armado e revestimento rígido, na transmissão: a) lateral (G. IX); b) descendente (G. XI).

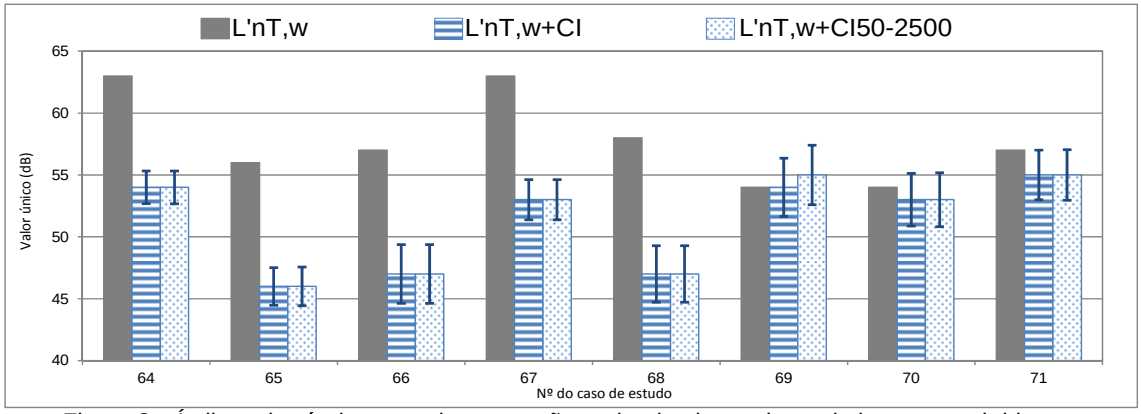



Figura 8 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos na transmissão descendente, com lajes de piso e pavimento flutuante ou de betonilha flutuante (grupo X).

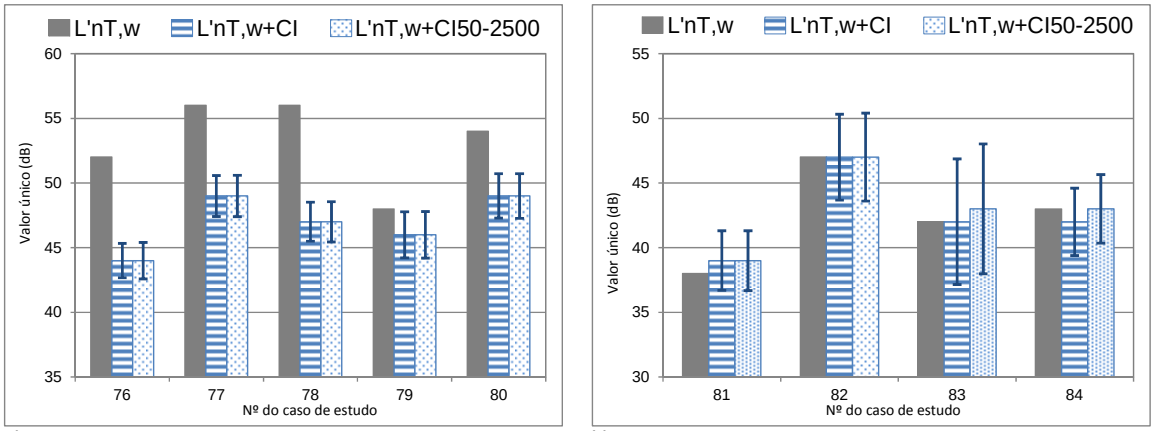



Figura 9 – Índices do nível sonoro de percussão padronizado e valores de incerteza, obtidos na transmissão ascendente: a) com laje e revestimento rígido; b) com pavimento ou betonilha flutuantes.

## 4. CONCLUSÕES

Dos vários exemplos analisados, e de uma forma geral, a inclusão de baixas frequências (abaixo de 100Hz) conduz a um agravamento no valor do índice somado ao termo de adaptação, no caso do isolamento a sons aéreos, em particular quando o espetro de ruído é do tipo "tráfego". De uma forma geral, para situações de elementos de separação pesados, o valor médio de $C$ aproxima-se de -1 dB, passando para cerca de -2 dB, com inclusão das baixas frequências. No caso do termo $Ctr_{50-5000}$, para elementos pesados (sem reforços leves), o valor situa-se na maioria das situações entre -3 e -5, e sofre um agravamento, em média, para as situações avaliadas, da ordem de 4 dB. Para elementos leves, para além deste termo ser tendencialmente ainda mais penalizante, sofre um agravamento ainda maior com a inclusão das baixas frequências. Em relação à incerteza, de uma forma geral, verifica-se um aumento também significativo com a inclusão das baixas frequências quando se considera o espetro de ruído de "tráfego", em particular para os elementos de separação leves (entre 4 a 5 dB).

Nos exemplos relativos aos sons de percussão, verificou-se que a introdução das medições nas baixas frequências praticamente não alterava os índices nem as incertezas associadas. Refira-se que as soluções analisadas dizem respeito sobretudo a pavimentos pesados. No caso de pavimentos leves, a importância das baixas frequências seria mais perceptível, o que tornaria mais relevante a sua inclusão nos cálculos de índices de isolamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05 com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.
[2] ISO 717-1, Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (1996 + AM1:2006).
[3] ISO 717-2, Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation (1996 + AM1:2006).
[4] Julieta António and Diogo Mateus, Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings, Applied Acoustics, Vol. 89 (2015) Pages 141-151
[5] Julieta António e Diogo Mateus, Influência da inclusão de medições em baixa frequência na determinação dos índices de isolamento sonoro, TECNIACUSTICA2013, AED2003, p. 789-796, Valladolid, 02 a 04 de Outubro 2013
[6] RELACRE, Guia RELACRE 22 – Cálculo de Incertezas – Acústica, ISBN: 978-972-8574-14-7, abril 2012.
[7] Mahn J, Pearse J. The uncertainty of the proposed single number ratings for airborne sound insulation. Journal of Building Acoustics 2012;19:145-72.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DETERMINACIÓN DEL $D_{nTw}$, (50-5000) DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO. PROPUESTA DE UN MÉTODO ALTERNATIVO BASADO EN LA ASTM E1322-90

PACS: 43.15.+s

Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, Marisol; Eva Calzado Estepa.
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante - Edif.: Politécnica II
Universidad de Alicante
Campus de San Vicente del Raspeig.
Email: jenaro@ua.es; myebra@ua.es; evace@ua.es; .

**ABSTRACT**
The results of insulation measures carried out in accordance with ISO 717-1: 2013 and ISO 16283-1: 2014, in two rooms, are presented: one of them with a small volume, less than 50 $m^3$. No significant differences in the results, with fixed microphone or manual movement, are found. The question of the expansion of the frequency range for the noise insulation calculation finds variations of up to 6 dB compared with no extended range in the spectral adaptation coefficient for traffic '$C_{tr}$' determination.
It is found, using the premises calculation methodology in determining the OITC (ASTM), that the results obtained for DnTw (C; Ctr) can be calculated more easily and efficiently with it. Which gives an advantage and a useful tool for calculating the behavior of an enclosure or building system against any noise spectrum.
.
KEYWORDS: ISO 717-1, ISO 16283-1, ASTM E1322-90, $D_{nTw}$, C, $C_{tr}$, OITC, Low frequency, acoustic insulation, Bonello.

**RESUMEN**
Se presentan los resultados de las medidas de aislamiento realizadas, según las normas ISO 717-1: 2013 e ISO 16283-1: 2014, en dos recintos: uno de ellos con un volumen pequeño, menor de 50 $m^3$. Se encuentra que no hay diferencias notables en los resultados hallados con micrófono fijo o con movimiento manual. Mientras que para la cuestión de la ampliación del rango de frecuencias si que se encuentran variaciones, de hasta 6 dB frente al rango no ampliado para los resultados del aislamiento al determinar el término de adaptación espectral para tráfico '$C_{tr}$'.
Se comprueba que los resultados obtenidos para $D_{nTw}(C;C_{tr})$ se pueden calcular de forma más sencilla y eficiente usando las premisas de cálculo de la metodología en la determinación del OITC (ASTM). Lo que otorga una ventaja y una herramienta útil para el cálculo del comportamiento de un cerramiento o sistema constructivo frente a cualquier espectro de ruido.

PALABRAS CLAVE: ISO 717-1, ISO 16283-1, ASTM E1322-90, $D_{nTw}$, C, $C_{tr}$, OITC, baja frecuencia, aislamiento acústico, Bonello.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo realizaremos una propuesta de un método alternativo al especificado en la UNE–EN ISO 717–1: 2013 para la determinación del $D_{nTw}$ ($C;C_{tr}$). Este método alternativo está basado en la norma ASTM E1322-90 para la determinación del índice OITC, válido para cualquier espectro de ruido, que es de extrema sencillez en su operativa y comparable al valor de $D_{nTw}$ +C, en el caso de aislamiento de particiones interiores y $D_{nTw}$ +$C_{tr}$, para aislamiento a ruido exterior.

La UNE–EN ISO 717–1: 2013 establece un método por el cual la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo se puede convertir en un sólo número que caracteriza el comportamiento acústico global del paramento, debiéndose calcular dos términos de adaptación espectral en base a dos 'espectros típicos', normalizados a 0 dB, en los rangos de frecuencia de 100 a 3150Hz. Estos dos términos pueden complementarse opcionalmente con los términos de adaptación del espectro adicionales, para cubrir los rangos de frecuencia ampliados entre 50 Hz y 5000 Hz.

Los términos de adaptación espectral C y $C_{tr}$ se han introducido en la Norma Internacional ISO 717-1 para tener en cuenta los espectros de fuentes de ruido tales como ruido rosa y ruido de tráfico[1].

Para el cálculo del índice OITC (Outside Inside Transmission Class) utilizado en la norma ASTM E1322-90 también se usa un espectro 'típico' expresado de forma natural (sin normalizar sus valores)[2]. Es ahí donde nos parece que reside su versatilidad

El índice OITC (1990), fue diseñado para medir la transmisión de ruido a través de elementos de fachada (ruido de tráfico, aviación, construcción, etc.), estos ruidos tienen componentes frecuenciales mas bajas que los ruidos producidos en el interior del edificio (voces), de tal forma que en el proceso de cálculo se hace hincapié en los sonidos de baja frecuencia. Hoy en día se

[1] Ver Tabla 4; espectros: 1,2,3,y 4
[2] Ver Tabla 4; espectro: 5

utiliza para evaluar aislamientos, en el mundo anglosajón, tanto a ruidos exteriores como interiores.

Expliquemos brevemente las sutiles diferencias entre la ISO y la ASTM:

Básicamente el índice $R_w$ definido en la norma UNE–EN ISO 717–1 es equivalente al índice STC (Sound Transmission Class) definido en ASTM E413-87 (Estados Unidos). Las principales diferencias son los rangos de frecuencia. STC cubre el rango de 125 Hz a 4000 Hz, mientras que $R_W$ de 100 Hz a 3150 Hz. Así que ambos consideran 16 bandas de tercio de octava. Otra de las diferencias la encontramos en las curvas de referencia que se desplazan en ambos métodos para determinar el valor del aislamiento con un número único. El STC lo define una curva que en 500 Hz tiene el valor de 0 dB, mientras que el valor del $R_W$ se encuentra con el desplazamiento de una curva que en 500 Hz tiene 52 dB. Los espectros de las curvas de referencia en ambas normativas solo difieren en los valores, no en su forma por lo que se puede decir que se puede decir que ambos índices son equivalentes (de hecho la ISO es una adaptación de la ASTM que ya existía por los años 90).

| Fr(Hz) | | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | **500** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Referencia** | **(ISO 717-1)** | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 48 | 51 | **52** | |
| **Referencia** | **(ASTM E413-87)** | | -16 | -13 | -10 | -7 | -4 | -1 | **0** | |
| | | | | | | | | | | |
| **Fr(Hz)** | | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
| **Referencia** | **(ISO 717-1)** | 53 | 54 | 55 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | |
| **Referencia** | **(ASTM E413-87)** | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

Tabla 1. Curvas de referencia ISO 717-1 y ASTM E413-87

Tanto el STC como el $R_w$ tan solo caracterizan el elemento o el sistema constructivo de forma independiente del espectro que se haya usado para su determinación, representan una característica objetiva del aislamiento, cuando queremos conocer su comportamiento frente a un determinado espectro, tenemos que realizar una serie de cálculos operativos que en función del espectro de ruido que deba soportar el sistema o elemento constructivo, que nos dirá cuál es su capacidad 'real' de aislamiento. De esta necesidad nace la operativa del cálculo de los términos de adaptación espectral (C; $C_{tr}$) recogida en el método propuesto por la ISO. Para el modelo de la ASTM se plantea el

mismo problema, y particularmente para las situaciones de aislamiento del ruido exterior se define el índice OITC, que podríamos decir que evalúa lo mismo que hace el término de adaptación espectral $C_{tr}$. La única característica normativa que los diferencia es el rango de frecuencias de cálculo para el OITC [80 a 4000 Hz] y para el $D_{nTw}(C_{tr})$ [100 a 3150 Hz]. Existiendo la posibilidad de calcular términos de corrección para espectros extendidos o ampliados en la normativa ISO. Esta diferencia espectral no es el motivo de nuestra apreciación positiva sobre el OITC, la bondad que le apreciamos estriba en su sencillez, como decía Eric Desart[3]:

> *El enfoque para el cálculo del índice OITC utiliza una lógica acústica/matemática moderna y fácil de calcular. Se puede introducir el estándar entero en una sola fórmula:*

$$OITC = 100.13 - 10 \times \log\left\{ \sum_{i=80Hz}^{4000Hz} 10^{\frac{(AWRS_i - TL_i)}{10}} \right\} \quad \text{(ec.1)}$$

Donde:

- $AWRS_i$ es el espectro de ruido de referencia ponderado A
- $TL_i$ es la pérdida de transmisión de sonido, para cada banda de tercio de octava.

La utilidad de esta fórmula, desde nuestro punto de vista, estriba en que se puede substituir fácilmente el espectro de referencia por cualquier otro espectro personalizado que cubra cualquier rango de frecuencia que se desee. De forma que no sólo sirve para calcular el OITC estricto o normativo, sino que si nuestro deseo es conocer como va a ser la respuesta en aislamiento de un sistema constructivo frente a un determinado espectro, que no tiene por que ser (y lo normal es que no lo sea) de los dictados en la norma, tenemos la posibilidad de hacerlo de forma rápida y versátil, sin preocuparnos de su alcance en frecuencias, ni de su nivel. También es cierto que si sólo nos preocupamos por

[3] El documento donde se vierten estas ideas es Calculation of: STC (Sound Transmission Class), $R_w$ (European) as per ISO 717-1,MTC (Music/Machinery Transmission Class), OITC (Outdoor-Indoor Transmission Class). Consultado en junio del 2015. Se puede descargar en: *www.bobgolds.com/STC_MTC_OITC_RW.doc*

obtener el valor de aislamiento con la única pretensión de cumplir normativa y regulaciones, huelga todo este discurso.

Para utilizar este enfoque para cualquier espectro, se le aplica la ponderación A a dicho espectro, se calcula la suma logarítmica de este espectro ponderado y se sustituye el factor '100.13', d la fórmula original, por dicha suma logarítmica. En términos aritméticos: el espectro y su suma, se utilizan para calcular la contribución relativa (porcentaje) de las bandas de frecuencia individuales, frente a un total de 100%.

## APLICACIÓN

Este ejercicio de aplicación que mostramos a continuación aprovecha el último revuelo sobre la determinación del aislamiento teniendo en cuenta el efecto de las bajas frecuencias. A modo de comprobación se han realizado medidas en dos recintos, donde uno de ellos está en el rango de aplicación de la nueva sistemática, mientras que el otro es un recinto de los considerados clásicos. Se aprovecha también para la ejecución de las medidas con micrófono estático y micrófono en movimiento manual. También se usaran los ejemplos antedichos para comparar los valores obtenidos del índice $D_{nTw}(C;C_x)$[4] con el que resulta de aplicar la fórmula del índice OITC pero usando los espectros de referencia que se definen en la normativa ISO, tanto los normales como los ampliados.

Se han seleccionado dos parejas de recintos pertenecientes a la Facultad de Educación de la Universidad de Alicante:

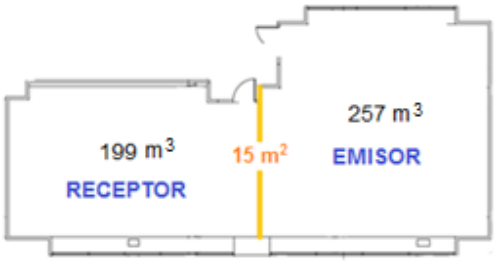
- Tipo 1: Dos aulas de Volumen ≅ 250 $m^3$.
- Tipo 2: Dos despachos de Volumen ≅ 25 $m^3$.

En los recintos tipo 2; se valorará el procedimiento introducido para medidas de bajas frecuencias en la norma UNE-EN ISO 16283-1.

[4] Con $C_x$ ; queremos indicar que vamos a usar tanto los espectros de referencia ISO para ruido de tráfico, como otros espectros (el espectro nº 0 será uno arbitrario y el nº 5 el que se usa en el cálculo del OITC de la ASTM que es un ruido de ambiente exterior pero con más carga en bajas frecuencias que los habituales en el estándar de tráfico en la ISO)

- **Tipo 1: Dos aulas de Volumen ≅ 200 - 250 $m^3$.**

En este tipo de recintos se realizaron medidas, de la pared de separación entre dos aulas de la Facultad de Educación de la Universidad de Alicante, con micrófono fijo y con micrófono de barrido manual (tres semicírculos), obteniendo los siguientes resultados:




**Medidas con micrófono manual:**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{nTW}$ $(C;C_{tr})_{100\text{-}3150}$ (dB) | | | 51 | -1 | -3 | |
| | $C_{50\text{-}3150}$ = | -2 | $C_{50\text{-}5000}$ = | -1 | $C_{100\text{-}5000}$ = | 0 |
| | $C_{tr,50\text{-}3150}$ = | -9 | $C_{tr,50\text{-}5000}$ = | -9 | $C_{tr100\text{-}5000}$ = | -3 |
| | | | | | | |

Tabla 2. Valores de la diferencia de niveles normalizada global y de los términos de adaptación espectral en los distintos rangos de frecuencia, tomados con micrófono manual

**Medidas con micrófono fijo:**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{nTW}$ $(C;C_{tr})_{100\text{-}3150}$ (dB) | | | 50 | -1 | -2 | |
| | $C_{50:3150}$= | -2 | $C_{50:5000}$= | -2 | $C_{100:5000}$= | -1 |
| | $C_{TR\ 50:3150}$= | -11 | $C_{TR\ 50:5000}$= | -11 | $C_{TR\ 100:5000}$= | -2 |
| | | | | | | |

Tabla 3. Valores de la diferencia de niveles normalizada global y de los términos de adaptación espectral en los distintos rangos de frecuencia , tomados con micrófono fijo

Se puede ver que la elección del método de medida con posiciones fijas de micrófono o de barrido manual, no tiene una gran trascendencia en el resultado obtenido en el $D_{nTw}(C;C_{TR})$ debido a que los términos de adaptación espectral varían únicamente en 1 dB.

Al ampliar el rango de medida de 50 a 3150 Hz, y de 50 a 5000 Hz los resultados de $D_{nTW}$+C disminuyen en 1 dB respecto a los resultados obtenidos en el rango entre 100 y 3150 Hz.

Por otra parte, al ampliar el rango de frecuencias en alta frecuencia, se observa que el valor de $D_{nTW}$+C únicamente varía entre 1 y 0 dB, para C y $C_{tr}$ respectivamente.

Vamos a realizar la comprobación de qué ocurriría si aplicáramos la operativa de la ISO (que pensamos que es demasiado farragosa) en el cálculo de adaptación espectral pero usando cualquier ruido. Se ha elegido solamente el caso del término para ruido exterior, que denominamos de forma genérica '$C_x$'. Los espectros se muestran en la tabla siguiente, están ponderados A y por supuesto normalizados a 0 dB.[5]

| Fr(Hz) | Espectro nº0(referencia) dB(A) | Espectro nº1 dB(A) | Espectro nº2 dB(A) | Espectro nº3 dB(A) | Espectro nº4 dB(A) | Espectro nº5 OITC dB(A) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | | | | -41 | -25 | |
| 63 | | | | -37 | -23 | |
| 80 | | | | -34 | -21 | -19.5 |
| 100 | -32 | -29 | -20 | -30 | -20 | -17.1 |
| 125 | -29 | -26 | -20 | -27 | -20 | -15.1 |
| 160 | -26 | -23 | -18 | -24 | -18 | -15.4 |
| 200 | -23 | -21 | -16 | -22 | -16 | -13.9 |
| 250 | -20 | -19 | -15 | -20 | -15 | -13.6 |
| 315 | -17 | -17 | -14 | -18 | -14 | -12.6 |
| 400 | -14 | -15 | -13 | -16 | -13 | -11.8 |
| 500 | -13 | -13 | -12 | -14 | -12 | -10.2 |
| 630 | -12 | -12 | -11 | -13 | -11 | -10.9 |
| 800 | -11 | -11 | -9 | -12 | -9 | -10.8 |
| 1000 | -10 | -10 | -8 | -11 | -8 | -11 |
| 1250 | -9 | -9 | -9 | -10 | -9 | -10.4 |
| 1600 | -9 | -9 | -10 | -10 | -10 | -11 |
| 2000 | -9 | -9 | -11 | -10 | -11 | -10.8 |
| 2500 | -9 | -9 | -13 | -10 | -13 | -11.7 |
| 3150 | -9 | -9 | -15 | -10 | -15 | -13.8 |
| 4000 | | | | -10 | -16 | -15 |
| 5000 | | | | -10 | -18 | |

Tabla 4. Espectros de referencia (normalizados a 0 dB) utilizados para el cálculo de $D_{nTw}(C_x)$

Y tambien para la normativa ASTM, (ahora su normalización es a 100 dB).

| Fr(Hz) | Espectro º0(referencia dB(A) | Espectro nº1 dB(A) | Espectro nº2 dB(A) | Espectro nº3 dB(A) | Espectro nº4 dB(A) | Espectro nº5 OITC dB(A) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | | | | 59 | 75 | |
| 63 | | | | 63 | 77 | |
| 80 | | | | 66 | 79 | 80.5 |
| 100 | 68 | 71 | 80 | 70 | 80 | 82.9 |
| 125 | 71 | 74 | 80 | 73 | 80 | 84.9 |
| 160 | 74 | 77 | 82 | 76 | 82 | 84.6 |
| 200 | 77 | 79 | 84 | 78 | 84 | 86.1 |
| 250 | 80 | 81 | 85 | 80 | 85 | 86.4 |
| 315 | 83 | 83 | 86 | 82 | 86 | 87.4 |
| 400 | 86 | 85 | 87 | 84 | 87 | 88.2 |
| 500 | 87 | 87 | 88 | 86 | 88 | 89.8 |
| 630 | 88 | 88 | 89 | 87 | 89 | 89.1 |
| 800 | 89 | 89 | 91 | 88 | 91 | 89.2 |
| 1000 | 90 | 90 | 92 | 89 | 92 | 89 |
| 1250 | 91 | 91 | 91 | 90 | 91 | 89.6 |
| 1600 | 91 | 91 | 90 | 90 | 90 | 89 |
| 2000 | 91 | 91 | 89 | 90 | 89 | 89.2 |
| 2500 | 91 | 91 | 87 | 90 | 87 | 88.3 |
| 3150 | 91 | 91 | 85 | 90 | 85 | 86.2 |
| 4000 | | | | 90 | 84 | 85 |
| 5000 | | | | 90 | 82 | |

Tabla 5. Espectros de referencia (normalizados a 100 dB utilizados para el cálculo de OITC

[5] Espectro nº 0, es un espectro arbitrario de un ruido cualquiera con menos carga en baja frecuencia.
Espectro nº 1 ≡ nº 1de la norma ISO 717-1 para el cálculo de C en el rango de frecuencias de 100 a 3150 Hz.
Espectro nº 2 ≡ nº 2 de la norma ISO 717-1 para el cálculo de Ctr en el rango de frecuencias de 100 a 3150 Hz.
Espectro nº 3 ≡ nº 1 de la norma ISO 717-1 para el cálculo de C en el rango de frecuencias de 50 a 5000 Hz.
Espectro nº 4 ≡ nº 2 de la norma ISO 717-1 para el cálculo de Ctr en el rango de frecuencias de 50 a 5000 Hz.
Espectro nº 5 de la ASTM E1322-90 para el cálculo de OITC en el rango de frecuencias de 80 a 4000 Hz.

Los resultados obtenidos por ambas metodologías son:

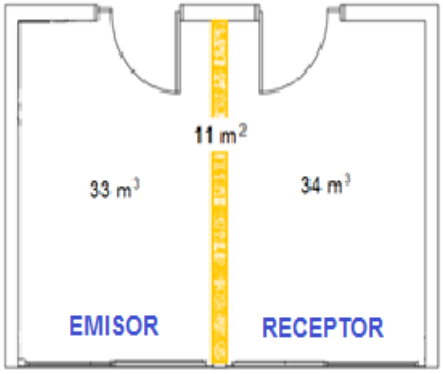
| | | |
|---|---|---|
| Espectro nº0(referencia) dB(A) | OITC | DnTw (C) |
| | 49 | 49 |
| Espectro nº1 dB(A) | OITC | DnTw (C) |
| | 49 | 49 |
| Espectro nº2 dB(A) | OITC | DnTw (Ctr) |
| | 48 | 48 |
| Espectro nº3 dB(A) | OITC | DnTw (Ctr) |
| | 45 | 45 |
| Espectro nº4 dB(A) | OITC | DnTw (Ctr) |
| | 39 | 39 |
| Espectro nº5 OITC dB(A) | OITC | DnTw ($C_{MIXEXT}$) |
| | 45 | 45 |

Tabla 6. Valores de $D_{nTw}(C,C_{tr})$ y OITC del elemento separador de las aulas con los espectros de referencia utilizados

De donde se puede deducir que los valores obtenidos de estos índices no dependen de la norma utilizada. Pero es evidente, sin embargo, que el comportamiento del cerramiento depende del tipo de ruido que incida sobre él. Es por lo que propugnamos: que aparte de determinar si un cerramiento cumple lo que dicta la normativa, que sirve para evaluar una calidad en la construcción de forma estandarizada, se debería conocer si realmente la protección supuesta es suficiente frente a los ruidos reales a los que va a estar expuesto dicho elemento. Consideramos que la información sobre el aislamiento real al considerar los espectros de ruido habituales en cada situación, es mucho más útil para analizar el comportamiento efectivo de nuestro sistema constructivo. Y que si el cálculo de dicho valor se hace mediante la fórmula usada en el OITC para cada espectro en particular, como la operativa es más sencilla, se puede realizar de forma rápida y eficiente.

- **Tipo 2: Dos despachos de Volumen ≅ 25 $m^3$.**

Este tipo de recintos se escogió para analizar la influencia de las bajas frecuencias en el valor global de la diferencia de niveles normalizada. Uno de los principales cambios que aparece en la actual ISO 16283-1, que pretende tener en cuenta los modos propios de vibración que pueden aparecer en la sala.



Los resultados obtenidos fueron:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{nTW}$ (C:$C_{tr}$)100:3150 (dB) | | | 44 | -1 | -3 | |
| | | | | | | |
| | C 50:3150= | -2 | C 50:5000= | -1 | C 100:5000= | -1 |
| | $C_{TR}$ 50:3150= | -6 | $C_{TR}$ 50:5000= | -7 | $C_{TR}$ 100:5000= | -3 |
| | | | | | | |

Tabla 7. Valores de la diferencia de niveles normalizada global y de los términos de adaptación espectral en los distintos rangos de frecuencia.

Se puede ver al ampliar el rango de medida a 50 - 3150 Hz, los resultados de $D_{nTW}$+C disminuyen en 1 dB respecto a los resultados obtenidos en el rango entre 100 - 3150 Hz. Y en el rango de 50 - 5000 Hz no hay variación. Sin embargo si nos fijamos en el resultado con $C_{tr}$, éste presenta una diferencia importante de 3 y 4 decibelios en los rangos de 50 - 3150 Hz y 50 - 5000 Hz respectivamente, lo que tiene una explicación robusta, pues el espectro de ruido de tráfico es más rico en bajas frecuencias que el espectro para el cálculo de 'C'. Por otra parte, al ampliar el rango de frecuencias en alta frecuencia, se observa que los índices de adaptación espectral no varían.

Para valorar el comportamiento del cerramiento frente a distintos tipos de ruidos, se han calculado los valores de los índices $D_{nTw}(C)$, $D_{nTw}(C_{tr})$ y OITC con los mismos espectros de ruido que en el caso anterior, obteniendo los siguientes resultados:

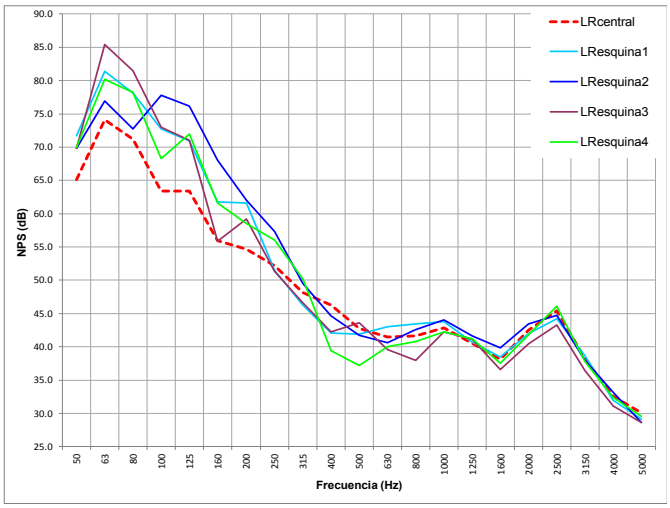
| Espectro nº0(referencia) dB(A) | OITC 43 | DnTw (C) 43 |
|---|---|---|
| Espectro nº1 dB(A) | OITC 43 | DnTw (C) 43 |
| Espectro nº2 dB(A) | OITC 41 | DnTw (Ctr) 41 |
| Espectro nº3 dB(A) | OITC 43 | DnTw (Ctr) 43 |
| Espectro nº4 dB(A) | OITC 38 | DnTw (Ctr) 38 |
| Espectro nº5 OITC dB(A) | OITC 37 | DnTw ($C_{MIXEXT}$) 37 |

Tabla 8. Valores de $D_{nTw}(C,C_{tr})$ y OITC del elemento separador de los despachos con los espectros de referencia utilizados

Se comprueba de nuevo que las dos propuestas, para la determinación de la protección obtenida, ofrecen los mismos resultados, y volvemos a repetir que los cálculos realizados con la metodología del OITC han sido mucho más sencillos que los realizados con la ISO.

Se sabe que en recintos pequeños, la variación espacial en los niveles de presión sonora aumenta para bajas frecuencias lo que incrementa la incertidumbre en el promedio espacial de los niveles de presión sonora. Y que las respuestas modales más intensas o detectables ocurren en habitaciones de volúmenes pequeños < 50 $m^3$, por lo que la distribución de los modos propios de un recinto para estas frecuencias puede ser irregular, siendo en las esquinas donde coexisten todos ellos. Es por esto que en el procedimiento de medida se coloca en ellas el micrófono.

Observando los espectros de las medidas realizadas en la habitación pequeña, Se puede distinguir que el comportamiento del sistema constructivo frente a los espectros de ruido 4 y 5, es mucho peor que frente a los otros espectros.




Gráfica 1: Niveles de presión sonora medidos en las esquinas y centro del recinto receptor con la fuente sonora en funcionamiento

Podemos apreciar una diferencia una máxima de 10 a 12 dB aproximadamente, entre el nivel más bajo, cuando la medida se realiza en la zona central de la sala, y el nivel más alto cuando la medida se tomó aproximadamente en una de las esquinas (a 0,5 m del la esquina).

Todo esto lo podemos justificar a la luz de las siguientes premisas:

- Los modos propios introducen inhomogeneidades tanto en los niveles de presión sonora como en los valores del tiempo de reverberación.

- Sus efectos son más importantes en bajas frecuencias y en salas pequeñas y paralelepípedas.

Para analizar este punto desde el punto de vista teórico, podemos usar:

- La frecuencia de corte o de Schroeder. Que determina la frecuencia de la sala a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, viene dada por:

$$f = 1849\sqrt{\frac{TR}{V}} \quad \text{(ec.2)}$$

  Donde, TR es el tiempo de reverberación de la sala (valor medio de las bandas de frecuencia de 500, 1000 y 2000 Hz) y V el volumen.

En nuestro caso el recinto receptor tiene un TR= 0.7 s y un V= 34 $m^3$, por lo tanto la frecuencia de corte es**: f= 265 Hz**.

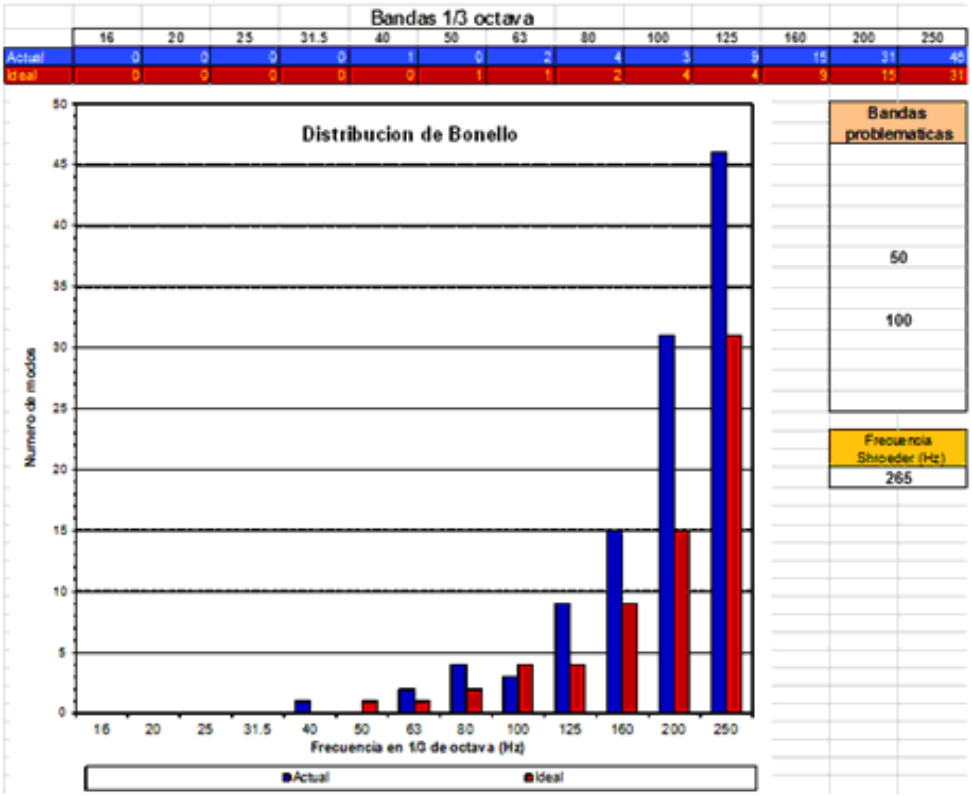
- El criterio de Bonello. Que consiste en calcular las frecuencias modales en una habitación y comprobar cómo se distribuyen en bandas de tercio de octava. Es importante que no haya modos coincidentes, sin embargo, si esto ocurre, es mejor tener al menos cinco frecuencias modales distribuidos en la misma banda.

Para comprobar estas condiciones, se construye un diagrama que contiene el número de frecuencias modales por banda de frecuencia de tercio de octava y se observa como la curva evoluciona. Si aparece regular y creciente, las frecuencias modales están bien distribuidas. Sin embargo, si el comportamiento es irregular, puede haber problemas de coloración en la respuesta acústica de la habitación.

Cuando los modos normales se acumulan predominantemente, de forma irregular y discontinua en una sola banda de frecuencia, la coloración no deseada puede degradar la calidad del sonido de una habitación.

Podemos ver en la página siguiente el diagrama de Bonello. En esa gráfica se comprueba, como cabía esperar, que la zona por debajo de los 100 Hz se comporta irregularmente. Hay que tener en cuenta que, para la interpretación

de los resultados obtenidos, no solamente es importante le determinación de lo que Bonello llama frecuencias problemáticas, caracterizadas por su carencia. Pues dicha carencia refuerza la presencia de sus vecinas, por ejemplo la de 40 Hz y la de 80 Hz, y esas son las que contribuirán al nivel de presión sonora recibida.




Gráfica 2: Respuesta modal de la sala

## CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que:

- El valor obtenido para determinar el aislamiento de una partición a partir de medidas 'in situ' es independiente de la norma utilizada UNE-EN ISO 717-1 o bien ASTM E1322-90.

- El comportamiento del sistema constructivo depende del ruido que incida sobre él, por lo que consideramos que es más cómodo y versátil utilizar la norma ASTM E1322-90 que la UNE-EN ISO 717-1.

- El índice OITC es mucho más versátil que el $D_{nTw}(C; C_{tr})$ para realizar los cálculos de protección frente al ruido ante cualquier espectro posible. No tiene complicaciones ni con el nivel de la señal ni con el alcance de su espectro.

- Es más efectivo utilizar los valores de índices de aislamiento acústico calculados para ruidos reales de ruido interior o exterior, para así realizar la elección de los elementos constructivos idónea, puesto que: dos elementos distintos, aún teniendo el mismo STC o $R_W$, pueden tener distinta respuesta - OITC o $D_{nTw}(C; C_{tr})$ – frente a la realidad.

- Las medidas realizadas en esquina en salas pequeñas para bajas frecuencias son útiles siempre que el comportamiento modal de la sala influya en los niveles de presión sonora de las frecuencias graves. En nuestro estudio no se han encontrado diferencias notables, en ninguno de los dos casos tratados, para el término de adaptación espectral 'C' al ampliar el rango en bajas frecuencias.

## REFERENCIAS

**[1]** ISO 717-1: 2013, Acústica – Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción - Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

**[2]** ISO 16283-1: 2014, Acústica – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation.

**[3]** ASTM E1322-90: 2010 - Standard Classification for Rating Outdoor-Indoor Sound Attenuation.

**[4]** ASTM E413-87: 1999 - Standard Classification for Rating Sound Insulation.

**[5]** Hopkins C, Turner P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. Appl. Acoust. 2005;66:1339-82.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO: EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN GRAN NÚMERO DE DATOS

PACS: 43.55.Rg

María Machimbarrena[1], Carolina Rodrigues A. Monteiro[1], Reine Johansson[2], Stefano Pedersoli[1], Sean Smith[3]
[1]Universidad de Valladolid – Applied Physics Department; Avenida de Salamanca s/n , 47014 Valladolid, Spain
[2]INTECO International Technology Consulting, Sländgatan 6, 451 62 Uddevalla, Sweden
[3]Edinburgh Napier University - Institute for Sustainable Construction; Colinton Rd 42, EH10 5BT Edinburgh, Scotland, UK

## RESUMEN

La acústica en la edificación es un campo en el cual la incertidumbre de un ensayo se expresa generalmente bien de acuerdo a la normativa en vigor o no se expresa en absoluto. En un mundo en el que las prestaciones acústicas de los elementos constructivos y de soluciones constructivas en conjunto son frecuentemente confrontadas al cumplimiento de una exigencia, parece conveniente facilitar el cálculo de incertidumbre asociado a un ensayo.

La norma UNE EN ISO 12999 indica los valores de incertidumbre asociados a medidas de aislamiento a ruido aéreo e impacto realizadas en distintas condiciones, obtenidos a partir de ensayos interlaboratorio. El objetivo del presente artículo es incentivar la realización del cálculo de incertidumbre individualizado no sólo en ensayos de aislamiento acústico, sino en todo el ámbito de la acústica de la edificación. Para ello se presenta una posible metodología y aplicación de la misma a un gran número de medidas de aislamiento a ruido aéreo in situ. Los resultados demuestran que la incertidumbre del valor global $D_{nTA}$ depende del rango de frecuencias incluido en el cálculo, aumentando ligeramente cuando el rango se extiende por debajo de 100 Hz.

## 1 INTRODUCCIÓN

La medida del aislamiento acústico en la edificación está regulada por las correspondientes normas tanto para ensayos en laboratorio UNE EN ISO 10140 [1] como in situ [2–4], algunas de la cuales se encuentran en fase de borrador final. Tradicionalmente la incertidumbre asociada a estas medidas se ha reportado bien de acuerdo a la correspondiente normativa de incertidumbre en medidas de aislamiento UNE EN ISO 12999-1 [5] o no se ha reportado en absoluto. Los valores de incertidumbre reflejados en la norma UNE EN ISO 12999-1 se han obtenido a partir de los resultados de un conjunto numeroso de ensayos interlaboratorio efectuados en diversos países Europeos (principalmente Alemania, pero también Francia, Suecia, Italia y Portugal).

Los valores de incertidumbre indicados en la norma pueden ser utilizados para determinar si un elemento constructivo o una solución constructiva cumplen con la exigencia normativa en cada caso y puede llegar a alcanzar implicaciones legales en caso de conflicto.

Según varios autores [6–8], no es posible ceñirse al protocolo establecido en la GUM [9] para efectuar el cálculo de incertidumbre en medidas de aislamiento acústico o parece razonable mantener la idea de incertidumbre en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad tal y como se hace en la UNE EN ISO 12999-1 y se hacía anteriormente en la derogada UNE 20140 [10]. Una de las razones es que algunas magnitudes como son el tiempo de reverberación o el nivel de presión sonora, no se miden directamente sino que se obtienen integrando en una determinada región del espacio, lo cual requiere ciertas hipótesis de base. Cuando dichas hipótesis no se cumplen completamente, resulta difícil construir un modelo matemático que incluya todos los posibles efectos y es precisamente por esto por lo que hasta ahora no se acostumbra a calcular la incertidumbre en medidas de aislamiento de acuerdo a GUM y en muchas ocasiones se reporta la incertidumbre de un ensayo como la incertidumbre asociada a un determinado método de medida tal y como establece la UNE EN ISO 12999-1. Sin embargo esto no está exento de problemas, pues la propia incertidumbre del objeto, entre otras cosas, no está incluida en los resultados.

## 2 ¿POR QUÉ REALIZAR CÁLCULOS DE INCERTIDUMBRE EN ACÚSTICA DE EDIFICIOS?

El objetivo de una medida es determinar el valor de una magnitud de interés, el mensurando. En este caso el mensurando puede ser el nivel de presión sonora, el índice de reducción sonora o cualquiera de los posibles valores únicos, como por ejemplo el $D_{nT,A}$. Realizar una medida no es más que obtener un valor de un universo de posibles valores, puesto que generalmente cuando se realiza una medida varias veces, se obtienen resultados diferentes. La variablidad observada en el resultado de medidas repetidas, se debe a que los parámetros que afectan a dicha medida son cambiantes. A pesar de que es imposible identificar todos los parámetros que afectan a una medida, sí es posible identificar los más significativos y estimar sus efectos sobre el resultado de la medida. Es más, frecuentemente es posible construir un modelo matemático (teórico, empírico o mixto) que determine cómo éstos afectan a la medida.

Existen muchos procedimientos para estimar la incertidumbre asociada a un ensayo, sin embargo las entidades de acreditación miembros del International Laboratory Accreditation Cooperation Mutual Recognition Arrangement (ILAC MRA) han acordado exigir a los laboratorios acreditados que determinen la incertidumbre de los ensayos siguiendo las indicaciones de UNE EN ISO 17025 [11], GUM y sus suplementos y/o ISO Guide 35 [12]. Para los laboratorios de ensayo también se recomienda el uso de GUM [13], aunque se admiten excepciones por ejemplo en aquellos casos en los que el proceso de determinación de la incertidumbre está incluido en una norma de ensayo. El documento ILAC G17 [13] sin embargo establece que dichas normas deben ser revisadas por las correspondientes entidades de normalización. Esto implica que cualquier norma de nuevo desarrollo o revisión de norma que vaya a ser utilizada en el ámbito del acuerdo ILAC MRA debería, en la medida de lo posible, utilizar la GUM o cualquier otro documento elaborado por las entidades de acreditación, cuando incluya un proceso de estimación de la incertidumbre de medida como parte de los contenidos de la norma.

Es cierto que en algunos campos de la ciencia tradicionalmente se trabaja con los conceptos de reproducibilidad y repetitibilidad, lo cual puede ser considerado adecuado siempre que la componente de reproducibilidad sea significativamente mayor que el resto de las componentes de la incertidumbre total, y se pueda considerar despreciable la aportación de cada una de las demás componentes. Sin embargo, para cumplir con la UNE EN ISO 17025 es importante investigar y documentar otras posibles componentes de la incertidumbre que puedan afectar al resultado de una medida.

Concretamente en el campo de la acústica de la edificación, la estimación de la incertidumbre asociada a un método de medida se ha realizado de acuerdo a la UNE EN ISO

5725 [14,15]. Los planteamientos de la UNE EN ISO 5725 y de la GUM son distintos. Por una parte la UNE EN ISO 5725 considera el procedimiento de medida como una "caja negra" y no necesita conocer en detalle de qué manera cada uno de los parámetros que afectan a la medida contribuye a la incertidumbre total asociada a la misma, mientras que la GUM tiene un

planteamiento que requiere un modelo para poder efectuar el análisis de la incertidumbre asociada a un ensayo.

Uno de los argumentos comúnmente utilizados para no ceñirse al uso de la GUM en el campo de la acústica de la edificación es la no existencia de un modelo completo para los mensurandos. Sin embargo, a pesar de que la GUM precisa de algún tipo de modelo, no estrictamente necesario que el modelo sea completo. De hecho la propia palabra "modelo" implica que no es una descripción perfecta de la realidad y la GUM señala que una de las componentes de la incertidumbre que siempre debe ser tenida en cuenta es la del propio modelo.

Por lo que respecta a sistemas no-lineales, existe un suplemento a la GUM [9] que indica cómo usar el método de Monte Carlo (simulaciones) para propagar las funciones de densidad de probabilidad en el modelo y así obtener una estimación de la incertidumbre de la medida. La GUM también incluye ejemplos de cómo utilizar desarrollos en serie de Taylor de orden superior para tratar la incertidumbre de sistemas no lineales.

Cuando se trata de la incertidumbre de los valores globales, los datos experimentales [8,16] muestran que existe correlación entre los valores obtenidos en los distintos 1/3 de octava, si bien es cierto que existe poca información al respecto hasta el momento. Es necesario investigar más este aspecto bien a partir de datos experimentales o mediantes cálculos, aunque si esto no fuera posible, la GUM permite el uso de correlaciones basados en la experiencia. En el caso de suponer una correlación positiva entre todas las bandas posiblemente se sobreestime la componente de la incertidumbre asociada a la correlación, pero a falta de otra información, esta opción parece la adecuada pues es la más conservadora. Si la experiencia corrobora que los coeficientes de correlación máximos son menores, entonces se podrá utilizar un valor menor que la unidad en la estimación de la incertidumbre de medida.

La sistemática propuesta en la UNE EN ISO 12999-1 para estimar la incertidumbre de medida sin realizar cálculos individuales es en cierto modo contraria a la UNE EN ISO 17025 y a otros procedimientos de acreditación. En algunos países como España y Portugal, las entidades de acreditación exigen a los laboratorios contar con procedimientos de estimación de incertidumbre conformes a la GUM o EA-4/02 [17]. Dado que los diversos laboratorios cuentan con personal, equipos y elementos de ensayo distintos, parece sensato que la incertidumbre asociada al ensayo sea diferente a pesar de haberse realizado de acuerdo a un mismo método de ensayo. Es esto precisamente lo que motiva este artículo, desde el cual se recomienda contar con un procedimiento de cálculo de incertidumbre, de acuerdo a GUM, aplicable a cada ensayo realizado, especialmente cuando se trate de medidas in situ.

## 3 OBJETIVO

Como ya se ha comentado, el principal objetivo de este artículo es animar a los laboratorios acreditados, consultores e investigadores que trabajen en el campo de la acústica de edificios a efectuar cálculos de incertidumbre lo más ajustados a la GUM posibles. No sólo por lo que respecta a ensayos de aislamiento sino para cualquier ensayo realizado por un laboratorio acreditado, como pudiera ser la absorción acústica.

En un artículo publicado recientemente [18] se ha descrito en detalle una propuesta de procedimiento para la estimación de la incertidumbre asociada a un ensayo de aislamiento a

ruido aéreo in situ. Presentamos en este artículo un resumen del anterior con el fin de extender el ámbito de influencia al ámbito iberoamericano, conscientes de que en ocasiones, en estos congresos más orientados a la comunidad de habla hispana o portuguesa se accede a un público diferente que a través de las revistas especializadas.

## 4 RESULTADOS DE UN CASO DE ESTUDIO

Uno de los parámetros más comúnmente utilizado para evaluar el aislamiento a ruido aéreo in situ es la diferencia de niveles estandarizada, $D_{nT}$

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10log\frac{T}{T_0} \qquad \text{en dB} \qquad (1)$$

donde $L_1$ es el promedio energético del nivel de presión sonora en la sala emisora, , $L_2$ es el promedio energético del nivel de presión sonora en la sala receptora, T es el tiempo de reverberación en la sala receptora y $T_0$ es el tiempo de reverberación de referencia, que para el caso de viviendas es $T_0$ = 0.5 s. Se trata de una magnitud que depende de la frecuencia y que en la mayor parte de los casos se mide en bandas de 1/3 de octava entre 100 Hz y 5000 Hz, aunque esto puede variar de unos países a otros. Este parámetro puede ser transformado en un valor global o valor único de distintas formas [19, 20], y el valor obtenido es el que se emplea para verificar el cumplimiento de las exigencias de los correspondientes Códigos de la Edificación o legislación aplicable. Este mismo procedimiento se utiliza a la hora de ensayar y declarar las prestaciones de aislamiento de puertas, ventanas o soluciones constructivas completas ensayadas en laboratorio.

El caso que se presenta utiliza como punto de partida una base de datos de medidas de $D_{nT}$ para cuatro tipos de paredes distintas: dos paredes pesadas (HWA y HWB) y dos paredes ligeras (LWA y LWB). En total se dispone de 1102 medidas diferentes. Todos los ensayos se han efectuado en UK sobre paredes construidas de acuerdo a las especificaciones de Robust Details (RD) [21]. Para garantizar el cumplimiento de la legislación vigente en UK y con las especificaciones de diseño y mano de obra de RD se realizaron inspecciones periódicas de la obra y medidas de acuerdo a la normativa de medida en vigor [22]. Los detalles de la base de datos y el desarrollo más detallado de todo el proceso se encuentran en [18].

El procedimiento para determinar la incertidumbre se puede resumir en la siguiente ecuación

$$u(D_{nT_i}) = \sqrt{\begin{matrix}[u_{rep}(L_1)\cdot c_{L_1}]^2 + [u_{rep}(L_2)\cdot c_{L_2}]^2 + \dots \\ \dots + [u_{rep}(L_b)\cdot c_b]^2 + [u(T)\cdot c_T]^2 + [u_{ins}\cdot c_{\boldsymbol{ins}}]^2\end{matrix}} \qquad (2)$$

Donde la incertidumbre típica para cada uno de los estimadores de entrada se puede determinar incluyendo la desviación típica experimental así como otras posibles fuentes de incertidumbre como pueden ser la instrumentación y el ruido de fondo.

La figura 1 muestra una selección aleatoria de curvas de incertidumbre calculadas a partir del conjunto completo de datos experimentales de partida. Como se puede observar, la dispersión de los valores obtenidos es significativa, lo cual corrobora la necesidad de efectuar cálculos de incertidumbre detallados cuando se realizan medidas de aislamiento acústico. Esta dispersión es más evidente a bajas frecuencias que en frecuencias medias y altas, aunque también se observa una dispersión considerable a altas frecuencias.

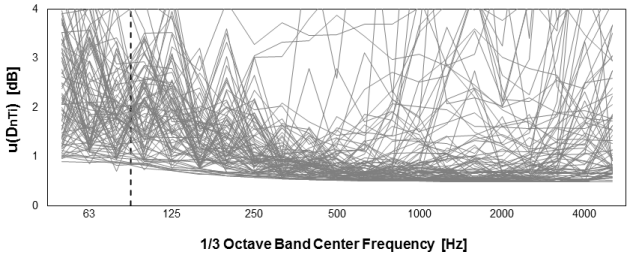



**Figura 1:** Dispersión de los valores de incertidumbre $u(D_{nT_i})$ calculados individualmente para el conjunto de datos

Para verificar el complimiento de una normativa, como ya se ha mencionado, se recurre al cálculo de valores globales. En este caso se ha elegido el parámetro utilizado en España: $D_{nT,A}$

$$D_{nT,A} = -10log \sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i}-D_{nT,i})/10} \qquad (3)$$

donde $L_{Ar}$ el espectro normalizado de ruido rosa y el subíndice "i" se refiere a la banda de tercio de octava correspondiente tanto para el espectro de referencia como para la diferencia de niveles estandarizada.

Para determinar la incertidumbre del valor global, se ha supuesto una correlación total entre las incertidumbres de las distintas bandas de tercio de octava (lo cual como ya se ha comentado sobreestimará la incertidumbre asociada al valor global, pero parece la mejor aproximación por el momento). Para efectuar el cálculo propuesto en la ecuación (4) se toma como valores de entrada los valores de incertidumbre calculados individualmente para cada una de las medidas $u(D_{nT_i})$. El cálculo se puede efectuar utilizando diversos rangos de frecuencias, (por ejemplo empezando en 50 Hz o 100 Hz y terminando a 5000 Hz). Esto se refleja en el subíndice. Para el caso particular $D_{nTA\ (50\text{-}5000)}$:

$$u(D_{nTA\ 50-5000}) = \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{10^{(L_i - D_{nT_i})/10}}{\sum_k 10^{(L_k - D_{nT_k})/10}} \right) \cdot u(D_{nT_i}) \qquad (4)$$

Al suponer una correlación total, la ecuación (4) se convierte en una suma lineal en vez de tratarse de la raíz de la suma de los cuadrados.

La figura 2 representa, para el conjunto total de los datos, la dispersión de los valores de incertidumbre obtenidos para el valor global $D_{nTA}$ así como el valor medio de dicha incertidumbre. Los cálculos se ha efectuado para dos rangos de frecuencia distintos (de 50 a 5000 Hz y de 100 a 5000 Hz). A la vista de los resultados, se puede deducir, con un nivel de confianza superior al 99,9% que $\overline{u(D_{nTA})_{50-5000}}$ es mayor que $\overline{u(D_{nTA})_{100-5000}}$. Es decir, a partir de los datos experimentales de partida y con la hipótesis de correlación positiva total, la incertidumbre del valor global $D_{nTA}$ sí aumenta al ampliar el rango de frecuencias utilizado en su cálculo.

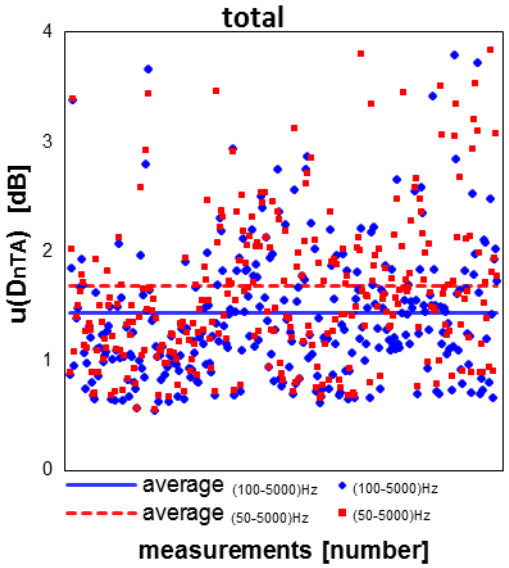



**Figure 2:** Dispersión de los valores de $\mathrm{u}(\mathrm{D}_{\mathrm{nTA}})$ y valores promedios correspondientes $\overline{\mathrm{u}(\mathrm{D}_{\mathrm{nTA}})}$

Cuando un laboratorio acreditado emite un certificado de calibración o de ensayo, se suele reportar la incertidumbre expandida con un factor de cobertura $\mathrm{k} = 2$, lo cual, si la distribución se puede suponer gaussiana, se corresponde con un nivel de confianza de aproximadamente 95%. En este caso de estudio se ha usado $\mathrm{k} = 1.7$, lo cual se corresponde así mismo con un nivel de confianza del 95% cuando se realizan verificaciones de cumplimiento de exigencias unilaterales. La hipótesis de distribución gaussiana para los valores de $D_{nTA}$ es discutible [23,24], pero al igual que en el caso de las correlaciones, parece la mejor hipótesis hasta la fecha. En todo caso se podía haber elegido cualquier otro valor. Para el $D_{nTA\ (50\text{-}5000)}$:

$$U\left(D_{nTA\ (50-5000)}\right) = k \cdot u\left(D_{nTA\ (50-5000)}\right) \tag{5}$$

La tabla 1 muestra la incertidumbre expandida calculada para cada uno de los cuatro tipos diferentes de paredes incluidas en este caso de estudio. Es importante mencionar que en este caso no se ha tenido en cuenta los grados de libertad ni otras posibles fuentes de incertidumbre.

Aunque se muestran los valores promedio, se ha observado que en casi el 10% de los casos estudiados ocurre que $u(D_{nTA})_{50-5000}$ > 3 dB y que la incertidumbre expandida correspondiente para $D_{nTA(50\text{-}5000)}$ es U > 5.1 dB. Esto puede ser definitivo a la hora de evaluar el cumplimiento de una exigencia normativa.

Los resultados de este estudio confirman que los valores de la incertidumbre expandida varían significativamente en función del tipo de pared y rango de frecuencias empleado, por lo cual se recomienda la realización de cálculos de incertidumbre individualizados para cada ensayo realizado in situ.

**Tabla 1:** Valor medio de la incertidumbre expandida calculada para el $D_{nTA}$ de distintos tipos de paredes.

| (valores medios) Tipo de pared | $\overline{U(D_{nTA})_{50-5000}}$ | $\overline{U(D_{nTA})_{100-5000}}$ |
|---|---|---|
| HWA_75 | 2.41 | 2.18 |
| HWA_100 | 2.35 | 2.16 |
| HWB_75 | 3.07 | 2.65 |
| HWB_100 | 2.50 | 2.25 |

| | | |
|---|---|---|
| LWA_50 | 3.61 | 2.79 |
| LWB_50 | 3.22 | 2.60 |

## 5 CONCLUSIONES

En la actualidad las exigencias en la edificación por lo que respecta a eficiencia energética, sostenibilidad y prestaciones acústicas son cada vez mayores. Cabe esperar que en el futuro los edificios residenciales sean calificados según sus prestaciones acústicas [25]. Es por tanto especialmente importante evaluar adecuadamente el aislamiento acústico y reportarlo con la incertidumbre asociada al ensayo correspondiente.

Tanto por los resultados obtenidos en este caso de estudio como por los resultados de otros autores, se concluye que es posible y recomendable la realización de estimaciones de incertidumbre individualizadas asociadas a cada ensayo. Es más, la gran variabilidad observada en la incertidumbre estimada en función del tipo de pared y rango de frecuencias, también indica la necesidad de realizar estos cálculos individualizados para no infraestimar la incertidumbre de una medida.

Esta propuesta se extiende igualmente a los ensayos de aislamiento a ruido de impacto y fachada. No se pretende que exista una única forma de estimar el aislamiento, sino que se propone que se incluyan unas directrices en la próxima versión de la norma UNE EN ISO 12999-1 como alternativa a la estimación de incertidumbre de medida basada en ensayos interlaboratorio. Si esta norma se va emplea en entornos y servicios acreditados, debería ser revisada para ajustarse a los documentos básicos mencionados en las guías ILAC.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ISO 10140- Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements - parts 1 to 5. 2010.

[2] ISO 16283-1:2014 Acoustics -- Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization; 2014.

[3] ISO/FDIS 16283-2: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation. 2015.

[4] ISO/FDIS 16283-3: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Façade sound insulation. 2015.

[5] ISO 12999-1 Acoustics -- Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics -- Part 1: Sound insulation. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2014.

[6] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. Acta Acust United With Acust 2007;93:375–86.

[7] Wittstock V, Bethke C. On the uncertainty of sound pressure levels determined by third-octave band analyzers in a hemianechoic room. Forum Acusticum, Budapest,Hungary: 2005.

[8] Wittstock V. Determination of Measurement Uncertainties in Building Acoustics by Interlaboratory Tests. Part 1: Airborne Sound Insulation. Acta Acust United with Acust 2015;101:88–98.

[9] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. vol. JCGM 101:2. Joint Committee For Guides In Metrology; 2008.

[10] Luque P, Fernández D, Colina C de la, Simón F. Convergencia de la repetibilidad de ensayos de aislamiento a ruido aéreo in situ. Tecniacústica, Sociedad Española de Acústica; 2005.

[11] ISO 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2005.

[12] ILAC P14:01/2013 ILAC Policy for Uncertainty in Calibration. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2013.

[13] ILAC-G17:2002 Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025. International Laboratory Accreditation Cooperation; 2002.

[14] ISO 5725-1:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 1: General principles and definitions. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1994.

[15] ISO 5725-2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results -- Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1994.

[16] Wittstock V. On the uncertainty of single-number quantities for rating airborne sound insulation. Acta Acust United with Acust 2007;93:375–86.

[17] EA-4/02 M:2013 -- Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European co-operation for Accreditation; 2013.

[18] Machimbarrena M, Monteiro CRA, Pedersoli S, Johansson R, Smith S. Uncertainty determination of in situ airborne sound insulation measurements. Appl Acoust 2015;89:199–210.

[19] ISO 717- Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation- Part 2: Impact sound insulation. 2013.

[20] Mondaca C, Machimbarrena M, Monteiro CRA. Comparison of some global indices to adequately assess airborne sound insulation. Euronoise 2012, 2012.

[21] Robust Details Ltd. Robust details handbook. Part E: Resistance to the passage of sound. 3rd ed. Milton Keynes, UK: 2013.

[22] ISO 140-4:1998 Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1998.

[23] Mahn J, Pearse J. The Uncertainty of the Proposed Single Number Ratings for Airborne Sound Insulation. Build Acoust 2012;19:145–72.

[24] Mondaca C, Monteiro CRA, Machimbarrena M. Análisis de la variabilidad e incertidumbre de medidas “in situ” del aislameinto acústico a ruido aéreo de paredes pesadas. VIII Congr. Iberoam. Acústica, Evora: 2012.

[25] COST TU0901. Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. DiScript Preimpresion, S. L.; 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# Análisis de los datos de precisión del coeficiente de absorción acústica medido en tubo de impedancias

43.58.+z

Sancho Gil Juan; Arnay Sarabia Héctor; Hrelja González Patricia.

E.T.S.I.ST
Ctra. De Valencia, Km 7
28031 Madrid
España
Tel. 913367795
Fax 913367784
jsancho@diac.upm.es

***Abstract —*** This paper presents a study of the accuracy of the results obtained in measuring the sound absorption coefficient in impedance tube, according to the UNE-EN ISO 10534-2 "Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance in impedance tubes. Part 2: Method of transfer function ". It is exposed the state of the art precision of this test method, expressed in terms of repeatability and reproducibility, and are identified the causes which produce the value of the precision obtained.

*Resumen* — En este trabajo se hace un estudio de la precisión de los resultados obtenidos en la medición del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia, según la norma UNE-EN ISO 10534-2 *"Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia". S*e expone el estado del arte de la precisión de este método de ensayo, expresada en términos de repetibilidad y reproducibilidad y se identifican las causas que producen el valor de la precisión obtenida.

## I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de acondicionamiento acústico de recintos, uno de los principales problemas con los que se enfrenta el ingeniero es conseguir una absorción adecuada del sonido. Afortunadamente, existen multitud de materiales que tienen la capacidad de absorber energía acústica. Las propiedades absorbentes de sonido de un material se expresan mediante el coeficiente de absorción acústica $\alpha$ en función de la frecuencia. Basándose en este parámetro, se decide qué materiales son más adecuados para revestir las paredes interiores de un recinto. Por tanto, para poder emplear un determinado material en un proyecto de acondicionamiento acústico, es imprescindible conocer previamente su coeficiente de absorción acústica $\alpha$ .

Actualmente, existen varios métodos para medir el coeficiente de absorción acústica de un material. Un método muy empleado consiste en medir las propiedades acústicas de un material utilizando un tubo de impedancia, tal y como se expone en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 *"Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia"*. Se trata de un método muy utilizado en estudios de investigación y desarrollo de nuevos materiales, ya que es un método rápido de ejecutar y solo se necesitan pequeñas muestras del material para llevar a cabo la medida. Este método determina el coeficiente de absorción acústica del material para incidencia normal. Para ello, se coloca la muestra de ensayo en un extremo del tubo y en el otro extremo se sitúa el altavoz. Se generan ondas planas en el interior del tubo empleando una señal aleatoria o pseudo-aleatoria y la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones cercanas a la muestra, con esto se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales entre los dos micrófonos, a partir de la cual se determina el coeficiente de absorción acústica del material [6].

En este trabajo se hace especial hincapié en el estudio de la precisión que se puede obtener al aplicar este método de ensayo normalizado. En general, es importante disponer de datos de precisión de los métodos de ensayo, pues sirven de referencia a los laboratorios para evaluar la precisión de los resultados, cada vez que aplican el método de ensayo. Cuando las normas de ensayo no aportan datos concretos de precisión, los mejores datos de precisión disponibles para los laboratorios se obtienen en los ejercicios de intercomparación. Estos ejercicios de intercomparación (pruebas de aptitud, PT) nos aportan datos de precisión, como son: la desviación típica de repetibilidad conjunta $S_r$ y la desviación típica de reproducibilidad $S_R$. La norma ISO 5725-2:1994 proporciona la metodología para abordar el tratamiento estadístico de los resultados de los participantes con el fin de obtener estos datos de precisión.

En la actualidad, la precisión de los resultados del coeficiente de absorción acústica, obtenidos al aplicar el método de ensayo definido en la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002, no está desarrollado a nivel práctico [6]. Por este motivo, este trabajo se centra en ofrecer datos prácticos sobre la precisión que puede alcanzarse al aplicar este método de ensayo.

## II. ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO. DATOS DE PRECISIÓN

En Julio de 2002 se publicó la norma española UNE-EN ISO 10534-2 "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia". Esta norma es la versión oficial, en español, de la norma europea EN ISO 10534-2 de Junio de 2001 que a su vez adopta íntegramente la norma internacional ISO 10534-2:1998.

En el momento de su publicación, no se disponía de información relativa a la repetibilidad y reproducibilidad del método de ensayo que describe dicha norma. Es por esto, que en relación a la precisión de este método de ensayo, la norma comenta que "se recomienda obtener esta información a partir de ensayos de intercomparación entre laboratorios lo más pronto posible" [6]. Sin embargo, no consta que durante los años siguientes a la publicación de la norma se haya realizado ningún tipo de ejercicio de intercomparación. Es a finales de 2013, cuando se llevó a cabo una intercomparación de ámbito internacional, en el que se aplica este método de ensayo para la medida del coeficiente de absorción acústica, denominado AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1, organizado por la red de laboratorios de acústica, ACUSTILAB en conjunción con RPS-Qualitas. En este ejercicio de intercomparación participaron 9 laboratorios, uno de ellos la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (ETSIST) de la Universidad Politécnica de Madrid. En este ejercicio se ensayaron dos tipos de materiales: lana de roca de 50 mm de espesor (fabricante: ROCKWOOL, modelo: 231.652) y lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor (fabricante: SAINT GOBAIN CRISTALERIA ISOVER ESPAÑA). De acuerdo al programa de intercomparación, cada laboratorio realizó cuatro ensayos completos de cada tipo de material aplicando la metodología dada por la norma UNE-

EN ISO 10534-2:2002. Para ello, el coordinador de la intercomparación suministró a los laboratorios, el material de ensayo del mismo lote de fabricación, y cada participante elaboró cuatro muestras de cada uno de los materiales y determinó el coeficiente de absorción acústica de cada una de las muestras.

Una de las carencias más relevantes de la norma UNE-EN ISO 10534-2 es que no especifica la forma en que se deben entregar los resultados de los ensayos, (frecuencias discretas, tercios de octava u octavas). Esta carencia, dificulta la comparación de los resultados entre los laboratorios, puesto que la resolución en frecuencia de las funciones de transferencia medidas, que sirven para la determinación de los valores del coeficiente de absorción, puede ser diferente en cada laboratorio. Este inconveniente lo resolvió el coordinador de la intercomparación proporcionando a los laboratorios participantes un formato específico para la presentación de los resultados de los ensayos [3]. Concretamente en la intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1, cada laboratorio presentó los valores de los coeficientes de absorción de cada muestra de ensayo en bandas de tercio de octava desde 100 hasta 5000 Hz, ambas inclusive. Mediante el tratamiento estadístico de los resultados de los participantes se determinó el valor asignado y la precisión del ejercicio de intercomparación, expresada en términos de desviación típica de repetibilidad, $S_r$ y desviación típica de reproducibilidad, $S_R$. En la Figura 1 se muestra la desviación típica de repetibilidad, $S_r$. Adicionalmente, en la Figura 2 que se muestra a continuación, se ha representado la desviación típica de reproducibilidad, $S_R$ obtenida en el mismo ejercicio de intercomparación.

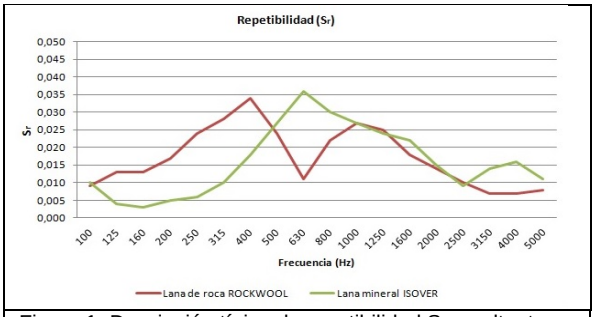



Figura 1. Desviación típica de repetibilidad $S_r$ resultante en la intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 [3].

Por otra parte, la norma americana ASTM E1050 “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”, publicada por ASTM International (American Society for Testing and Materials), en la cual también se describe la medida del coeficiente de absorción acústica por el método de la función de transferencia. En relación a la precisión, esta norma afirma que las medidas del coeficiente de absorción acústica mediante dicho método, se pueden hacer con gran precisión y apunta a que las mayores causas de imprecisión están relacionadas con la preparación y la instalación de la muestra de ensayo en el tubo de impedancia [1]. Además, añade que al no haber un material de referencia disponible del cual se conozcan los valores verdaderos de coeficiente de absorción, no es posible determinar cuantitativamente el sesgo de este método de ensayo [1]. A diferencia de la norma UNE-EN ISO 10534-2, esta norma sí proporciona datos de repetibilidad y reproducibilidad del método, obtenidos a partir de un programa interlaboratorio diseñado al efecto (Round-Robin) en el que participaron 10 laboratorios ensayando un único tipo de material. La precisión que aporta la norma ASTM E1050 determinada en el interlaboratorio (Round-Robin) se expresa en bandas de octava, en términos de límite de repetibilidad $I_r$ y cuyo resultado se muestra en la Figura 3. Además, esta norma también proporciona el límite de reproducibilidad, $I_R$ igualmente en bandas de octava, cuyos valores se muestran en la Figura 4.

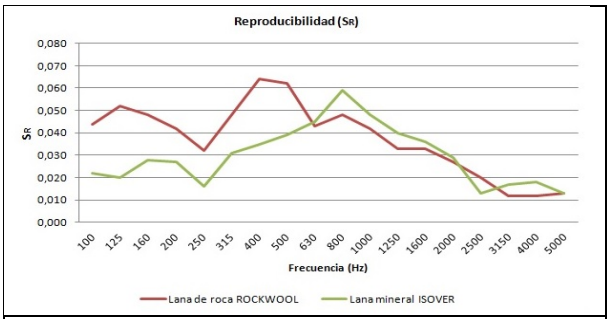



Figura 2. Desviación típica de reproducibilidad $S_R$ resultante en la intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1 [3].

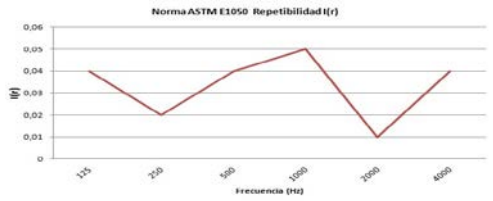



Figura 3. Repetibilidad $I_r$ proporcionada por la norma ASTM E1050 [1].




Figura 4. Reproducibilidad $I_R$ proporcionada por la norma ASTM E1050 [1].

## III. MARCO TEÓRICO [6]

El método de medición de la función de transferencia descrito en la norma UNE-EN ISO 10534-2 se basa en el hecho de que el coeficiente de absorción acústica para incidencia normal $\alpha$, puede determinarse a partir de la función de transferencia compleja $H_{12}$ calculada a partir de la presión acústica captada por dos micrófonos colocados en dos posiciones frente al material ensayado, concretamente en las posiciones 1 y 2 como puede verse en la Figura 5.

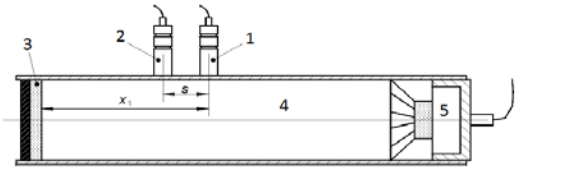



Figura 5. Diagrama del tubo de impedancia: 1. Micrófono A, 2. Micrófono B, 3. Muestra de ensayo, 4. Tubo de impedancia, 5. Altavoz [6].

La función de transferencia $H_{12}$ se obtiene dividiendo la presión acústica compleja en la posición 2 entre la presión acústica compleja en la posición 1.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \qquad (1)$$

La presión acústica de la onda que incide al material $p_I$ y la de la onda que se refleja $p_R$ se definen mediante (2) y (3).

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \qquad (2)$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{-jk_0 x} \qquad (3)$$

Donde $\hat{P}_I$ y $\hat{P}_R$, son los módulos de $p_I$ y $p_R$ en el plano de referencia (x =0) y $k_0 = k_0' - jk_0''$ es el número de onda complejo.

Por tanto, las presiones acústicas $p_1$ y $p_2$ en las posiciones de micrófono 1 y 2 se determinan mediante (4) y (5), donde $x_1$ y $x_2$ son las distancias de la muestra de ensayo a las posiciones de micrófono 1 y 2, respectivamente.

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_1} \qquad (4)$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \qquad (5)$$

Además, la función de transferencia para las ondas incidente $H_I$ y reflejada $H_R$ se definen mediante (6) y (7).

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (6)$$

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (7)$$

Donde: $s = x_1 - x_2$, es la distancia de separación entre los dos micrófonos.

La función de transferencia $H_{12}$ para el campo acústico total puede obtenerse ahora sustituyendo (4) y (5) en (1) y, teniendo en cuenta que $\hat{p}_R = r\,\hat{p}_I$, se puede definir mediante (8).

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}} \quad (8)$$

La expresión del coeficiente de reflexión para incidencia normal se obtiene despejando $r$ de (8) y empleando las expresiones (6) y (7), obteniendo:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (9)$$

El coeficiente de absorción acústica $\alpha$ para incidencia normal, se obtiene a partir del coeficiente de reflexión aplicando la ecuación:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (10)$$

Donde $r_r$ y $r_i$ son las componentes real e imaginaria, respectivamente, del coeficiente de reflexión para incidencia normal.

## IV. ESTUDIOS SOBRE LA PRECISIÓN DEL MÉTODO

Un método de ensayo siempre aporta parámetros indicativos de precisión, siendo los más habituales, la repetibilidad r y reproducibilidad R, que se definen como diferencias críticas con un nivel de probabilidad del 95%. La norma UNE-EN ISO 10534-2 no aporta ninguno de estos datos [6] y, por tanto, para poder disponer de información sobre estos datos de precisión se llevó a cabo la intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1. También se realizaron ensayos para determinar en qué medida influye la colocación y el corte de la muestra de ensayo sobre los resultados de repetibilidad. Además, se estudió la influencia de la temperatura (T) y la distancia entre los dos micrófonos (**s**) en los resultados del coeficiente de absorción.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de acústica de la (ETSIST) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Para ello, se empleó un tubo de impedancia cuyo intervalo de frecuencia de trabajo cubre las bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz inclusive. Se ensayaron dos tipos de materiales: lana de roca de 50 mm de espesor de ROCKWOOL, modelo 231.652 (Figura 6.a), y lana mineral CLIMAVER NETO de 25 mm de espesor de ISOVER (Figura 6.b). Los coeficientes de absorción acústica obtenidos en los ensayos se presentaron en bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz.

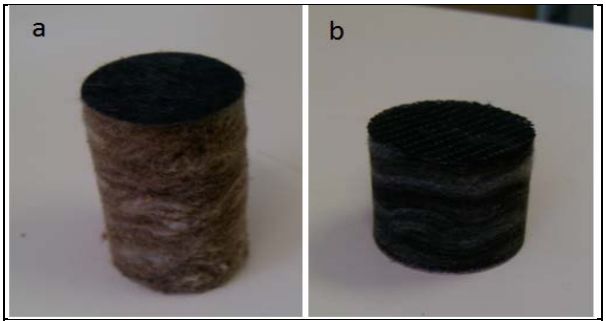


Figura 6. Materiales ensayados: a. lana de roca de ROCKWOOL, b. lana mineral CLIMAVER NETO de ISOVER.

Para estudiar el grado de influencia de la colocación de la muestra de ensayo en el porta-muestras sobre los resultados de repetibilidad se realizaron cuatro ensayos, correspondientes a dos muestras de lana de roca de ROCKWOOL y dos muestras de lana mineral de ISOVER. De cada una de las muestras de ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia, extrayendo la muestra y volviéndola a introducir en el tubo de impedancia en cada medición. En la Figura 7 se muestra la desviación típica de repetibilidad utilizando la misma muestra de ensayo, la única variación consistió en cómo se colocaba la muestra en el porta-muestras para cada medida. Por consiguiente, la dispersión entre los tres coeficientes de absorción acústica de la misma muestra de ensayo se puede considerar provocada principalmente por la colocación de la muestra [2]

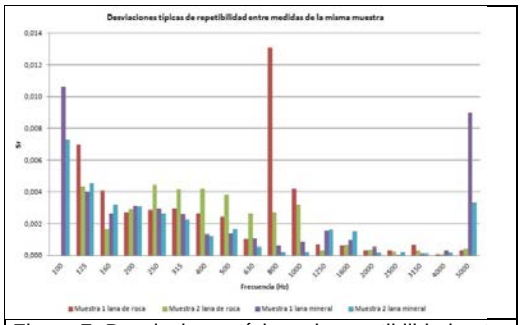


Figura 7. Desviaciones típicas de repetibilidad entre los coeficientes de absorción acústica medidos de la misma muestra [2].

En la Figura 8 se muestra los valores de la desviación típica de repetibilidad r entre las cuatro muestras de cada material El estudio de la influencia del proceso de corte de las muestras de ensayo sobre la repetibilidad de los resultados se llevó a cabo con los resultados obtenidos en ocho ensayos, correspondientes a cuatro muestras de lana de roca de ROCKWOOL y cuatro muestras de lana mineral de ISOVER. De cada muestra de ensayo se realizaron tres mediciones de la función de transferencia. A partir de las tres funciones de transferencia medidas se determinaron los tres coeficientes de absorción acústica y se promediaron para obtener el coeficiente de absorción acústica de la muestra de ensayo. Por tanto, se dispuso de cuatro coeficientes de absorción por cada material, uno por muestra ensayada, y se calculó la desviación típica de repetibilidad entre ellos. Entre ensayos del mismo material las condiciones de medida no variaron, sin embargo, la muestra bajo estudio era distinta en cada ensayo. Se puede concluir que la variabilidad entre los cuatro coeficientes de absorción acústica del mismo material es provocada principalmente por el proceso de corte de las respectivas muestras [2].

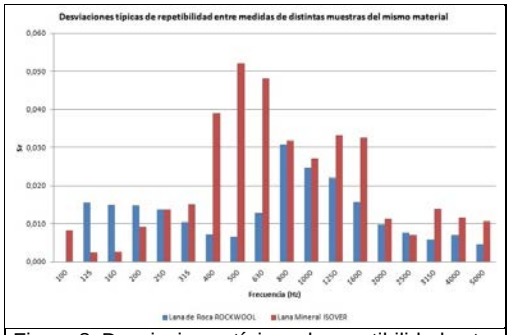


Figura 8. Desviaciones típicas de repetibilidad entre los coeficientes de absorción acústica medidos de distintas muestras del mismo material [2].

Por otra parte, se analizó la concordancia entre la repetibilidad obtenida en los cuatro ensayos de cada material con los datos de precisión proporcionados por la norma ASTM E1050, en la Figura 9 se comparan, en bandas de octava desde 125 Hz hasta 4000 Hz, los límites de repetibilidad obtenidos en los cuatro ensayos realizados de cada material con los

límites de repetibilidad proporcionados por la norma ASTM E1050.

Para estudiar el grado de influencia de la temperatura T y la distancia entre los micrófonos ***s*** en el resultado del coeficiente de absorción medido, se emplearon los resultados obtenidos en dos ensayos, uno de ellos sobre una muestra de lana de roca de ROCKWOOL y el otro sobre una muestra de lana mineral de ISOVER. El estudio consistió en determinar los coeficientes de absorción acústica de cada material a partir de las funciones de transferencia medidas empleando, por un lado, distintos valores de T y, por otro lado, distintos valores de ***s***, en función de los intervalos de variación supuestos al valor medido. Mediante un procedimiento de cálculo, se pudieron observar las variaciones del coeficiente de absorción en función de los valores de T y ***s***. En la Figura 10 se comparan los coeficientes de absorción acústica determinados con los valores de *T* medidos y los coeficientes de absorción acústica determinados con los valores de *T* correspondientes al mayor intervalo de variación aplicado, es decir, ±4 ºC. Por otra parte, en la Figura 11 se comparan los coeficientes de absorción acústica determinados con el valor de ***s*** proporcionado por el fabricante y los coeficientes de absorción acústica determinados con el valor de ***s*** correspondiente al mayor intervalo de variación aplicado, es decir, ±0,002 m.

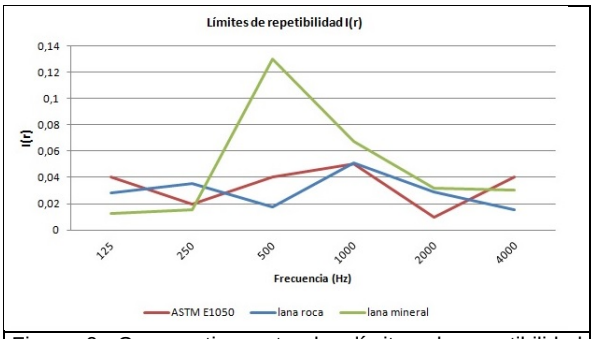



Figura 9. Comparativa entre los límites de repetibilidad obtenidos en los ensayos y los proporcionados por la norma ASTM E1050.

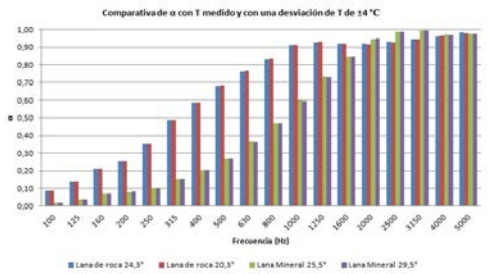



Figura 10. Comparativa de valores del coeficiente de absorción calculados con T medido y con una desviación de T de ±4 ºC [2].




Figura 11. Comparativa de valores del coeficiente de absorción calculados con *s* del fabricante y con una desviación de *s* de ±0,002 *m* [2].

## V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Analizando los resultados obtenidos del estudio de la influencia de la colocación de la muestra (Figura 7) se observa que, salvo algún valor puntual, la desviación típica de repetibilidad entre medidas de la misma muestra es pequeña en todo el rango de frecuencia, lo cual revela que la precisión de las medidas es elevada.

En el estudio de la influencia del corte de las muestras (Figura 8) las desviaciones típicas son mayores que en el estudio anterior, lo cual hace indicar que el corte de las muestras provoca que la repetibilidad entre las medidas sea menor y, como consecuencia, la precisión del método también lo sea. Esto revela que el corte de las muestras puede afectar a la precisión de las medidas, en mayor o menor grado, según el tipo de material a ensayar.

Al comparar los límites de repetibilidad obtenidos en los cuatro ensayos realizados de cada material con los límites de repetibilidad proporcionados por la norma ASTM E1050 (Figura 9), se

observa que la repetibilidad correspondiente a los ensayos del material de lana de roca se asemeja a los datos proporcionados por la norma ASTM E1050.

En cuanto a la influencia sobre los valores del coeficiente de absorción como consecuencia de variaciones de la temperatura, los resultados del estudio reflejan que ciertas desviaciones en la medida de la temperatura no afectan al valor del coeficiente de absorción. Puede verse en la Figura 10 ya que, incluso suponiendo desviaciones de hasta 4 ºC, apenas se observan variaciones del coeficiente de absorción.

Respecto a la influencia sobre los valores del coeficiente de absorción en función de variaciones en la medida de la distancia entre micrófonos, los resultados obtenidos en el estudio (Figura 11) revelan que hasta la banda de 4000 Hz, variaciones de 1 mm o menos provocan mínimas modificaciones de $\alpha$ (en torno a 0,01), mientras que una variación de 2 mm provoca que los cambios en $\alpha$ aumenten en algunas bandas (entre 0,01 y 0,03.

## VI. CONCLUSIONES

Resumen de las conclusiones obtenidas.

Cuando se ensayan muestras uniformes, como las analizadas en este estudio, la dispersión entre medidas de la misma muestra es baja, siempre y cuando la muestra se coloque de forma adecuada para cada medición

La desviación entre los resultados de las medidas de distintas muestras del mismo material aumenta con respecto a la dispersión entre medidas de la misma muestra. Esto revela que la influencia del corte de las muestras en los valores de repetibilidad es mucho mayor que la de su colocación. Por tanto, se puede concluir que el corte de la muestra es un factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la precisión de los resultados de este método de ensayo ya que representa claramente un foco de dispersión. Debido a esto, resulta evidente la necesidad de estudiar en un mismo ensayo varias muestras del mismo material, para así tener en cuenta la variabilidad producida por el corte de las muestras. En el presente estudio se propone realizar el ensayo siempre con, al menos, tres muestras del material bajo estudio. En cuanto al efecto sobre el resultado de un ensayo de posibles desviaciones en la medida de la temperatura se puede decir que, incluso desviaciones de hasta 4 ºC con respecto al valor medido, apenas modifican los valores del coeficiente de absorción. Por el contrario, desviaciones en la medida de la distancia entre micrófonos ***s*** sí condicionan la precisión del método de ensayo en todo el rango de frecuencias, especialmente en la banda de 5000 Hz si la desviación se comete por encima del valor nominal.

## REFERENCIAS

[1] ASTM E1050-90 – “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”, 1998.

[2] Héctor Arnay Sarabia. “Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia”. Trabajo Final de Máster (MIAEMA), mayo 2014.

[3] Informe final intercomparación AQUS-TUBO_IMPEDANCIA_1.

[4] UNE 82009-1:1998 – “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 1: Principios generales y definiciones”.

[5] UNE 82009-2:1999 – “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado”.

[6] UNE-EN ISO 10534-2:2002 – Acústica. “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LA AUSENCIA DE NORMATIVIDAD SOBRE AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LAS EDIFICACIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO. EL CASO DE UNA INSTITUCIÓN EDUCATIVA

PACS 43.50.Sr

Rodríguez-Manzo, Fausto*; Ponce-Patrón, Dulce R.; García-Martínez, Silvia G.; Garay-Vargas, Elisa; Lancón-Rivera, Laura A.
Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Departamento de Procesos y Técnicas de Realización. Av. San Pablo 180 Edificio S 1º piso, Col. Reynosa-Tamaulipas, CP 02200, Azcapotzalco, México, Distrito Federal.
Teléfono (52) 55 53189000 ext. 2236, ladac@correo.azc.uam.mx

## ABSTRACT

Recently Mexico City has begun to raise awareness about environmental noise. Today a noise map exists as well as a local regulation related to noise stationary sources. However, it has not yet effectively regulated the impact of environmental noise in sensitive spaces and urban land use areas of the city. As part of this research, a case study related to a higher education institute building is described, in which the absence of proper regulations has had a significant impact on environmental noise. Noise maps, acoustic measurements and a diagnostic study are presented.

## RESUMEN

Hasta hace poco es que la ciudad de México comienza a hacer conciencia en relación al ruido ambiental, cuenta ya con un mapa de ruido y una normatividad relacionada con fuentes fijas, sin embargo, aún falta regular la incidencia del ruido ambiental en los espacios y usos sensibles de la ciudad. En esta investigación se describe un caso de estudio relacionado con una institución de educación superior que ante la ausencia de una normativa se ha visto afectada por la incidencia del ruido proveniente del exterior. Se presentan mapas de ruido, mediciones acústicas y un diagnóstico de la situación.

## INTRODUCCIÓN

El ruido ambiental es un problema similar en todas las grandes ciudades y la ciudad de México no es la excepción. En términos de protección acústica las autoridades de las ciudades pueden emitir normas de carácter obligatorio para proteger a los ciudadanos, tanto en los aspectos urbanos como en los referidos a las edificaciones. Así, existen normas enfocadas en evitar las altas emisiones de ruido provenientes de las fuentes que generan sonido desde establecimientos privados o públicos, como también normativas y reglamentos que buscan proteger a los edificios del ruido ambiental y así regular la construcción como una forma de mitigar el impacto del ruido ambiental en sus ocupantes.

Muchos países cuentan con una reglamentación para la protección acústica de los edificios, generalmente conocidas como normas o códigos técnicos de edificación, sin embargo, en la actualidad, en México no existe ninguna ley, norma o reglamento, que obligue a los promotores, arquitectos, ingenieros y constructores al aislamiento acústico de los edificios y sus espacios tanto del ruido proveniente del exterior, como del interior; esto tiene un efecto importante en edificios donde se ubican espacios sensibles.

Los edificios que están expuestos a la influencia de las vialidades son altamente propensos a ser invadidos en su privacidad y en sus actividades por los niveles sonoros, provenientes ante todo del tráfico vehicular, llegando a afectarlos seriamente. Esto hace imprescindible que se cuente con una protección de aislamiento acústico mínima para asegurar que toda actividad quede apartada de esta influencia.

Este trabajo muestra el problema de la ausencia de una normatividad con respecto al ruido ambiental y el aislamiento acústico de los edificios en México, a través de las particularidades de un caso de estudio específico.

## MARCO GENERAL

Hoy día en la ciudad de México muchos de los edificios con espacios sensibles, como los hospitales, las escuelas y las viviendas, quedan expuestos a la contaminación acústica, ya que además del ruido por tráfico vehicular, el aeropuerto se localiza al interior, en la zona oriente de la ciudad, generando que las rutas de aterrizaje y despegue la crucen desde o hacia el poniente; además algunas vías de ferrocarril de carga afectan a las personas a su paso, sobre todo al accionar la bocina; la línea de ferrocarril rápido, de carácter urbano, que va del centro de la ciudad al norte del área metropolitana, está presente en la zona conurbada. Por otro lado algunas líneas del Metro son elevadas y superficiales, la mayoría utiliza sistemas de rodamiento de neumáticos, con excepción de la línea 12 que presenta rodamiento metálico sobre vía metálica, que genera un ruido molesto e importante en zonas habitacionales. La ciudad cuenta además con industria localizada y dispersa, obras de construcción pública y privada, y fuentes provenientes de zonas de esparcimiento y ocio, así como los sonidos propios de los vecindarios.

Ante este panorama las autoridades de la ciudad han intentado atender el problema de ruido ambiental, generando primero en 2006 una norma ambiental NADF-005-AMBT-2006, que se actualizó en 2013 [1], ésta se aplica únicamente a las fuentes fijas en establecimientos y no contempla el ruido de fuentes móviles. Posteriormente, entre 2009 y 2011, se construyó el Primer Mapa de Ruido para la ZMVM[1], como instrumento básico para el seguimiento del problema del ruido ambiental en la ciudad y concretamente el problema del ruido por tráfico vehicular. Se instaló también, por parte de las autoridades ambientales, una red piloto de monitoreo de ruido con el fin de establecer un sistema de monitoreo asociado con el problema de contaminación ambiental de la ciudad. Hasta ahí ha quedado, al momento, la intervención gubernamental.

El estudio del ruido ambiental se ha desarrollado en los últimos años con mayor presencia dentro del ámbito académico que del gubernamental, donde se distingue a la UAM-A[2], de la cual han surgido estudios e investigaciones que muestran que las zonas que son sensibles al ruido como las de vivienda, las mixtas con vivienda, y el equipamiento urbano, como los

[1] ZMVM son las siglas para la Zona Metropolitana del Valle de México, que representa el área conurbada de la ciudad de México.

[2] UAM-A, son las siglas para la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, donde el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico desarrolló el Primer Mapa de Ruido para la ZMVM, en vinculación con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad.

hospitales y las escuelas, son las tipologías más afectadas por los niveles y presencia del ruido ambiental [2].

Por otro lado, la planeación urbana de la ciudad a cargo de las instancias dedicadas al desarrollo urbano y a las obras públicas, generan los programa de desarrollo urbano (delegacionales y parciales, entre otros), donde quedan plasmados los usos del suelo. Cabe resaltar que aspectos que tienen que ver con una planeación basada en la protección ante fenómenos como la contaminación y concretamente la contaminación acústica, no están incluidos.

### La normatividad acústica en México

De las normas que se relacionan con la acústica en México, las normas oficiales y las ambientales relacionadas con el ruido ambiental que existen, se enfocan en el ruido generado por fuentes fijas; NADF-005-AMBT-2013 [1] y NOM-081-SEMARNAT-1994 [3], y ninguna de ellas hace referencia a la necesidad de aislamiento acústico en las edificaciones.

La norma NMX- 060-SCFI-2014, de carácter comercial y no obligatorio, es la más orientada a la protección acústica de los edificios ante el fenómeno del ruido ambiental y en ella se "*. . . establecen las propiedades de las ventanas, puertas y cerramientos a fin garantizar a los usuarios la calidad y seguridad de estos productos en territorio nacional*" [4]. Ésta considera, entre otras cosas, el aislamiento acústico haciendo referencia a niveles de confort en tipologías arquitectónicas así como requerimientos de atenuación acústica con relación a la intensidad de ruido exterior en componentes de fachada. Sin embargo esta norma solo es aplicable a la fabricación y evaluación de productos arquitectónicos.

## MARCO ESPECÍFICO DEL PROBLEMA

Se presenta como caso de estudio una Institución de Educación Superior, ubicada al nororiente de la ciudad de México, la cual cuenta con aproximadamente 2000 usuarios (alumnos, profesores y personal administrativo) que desarrollan sus actividades al interior de los espacios destinados a aulas, laboratorios, biblioteca y oficinas.

Se trata de un edificio localizado en un predio que colinda con dos vialidades primarias (10 carriles) y una secundaria (8 carriles), de gran afluencia vehicular donde dos de ellas son vialidades en pendiente. Es además muy cercano al Aeropuerto Internacional de la ciudad y está frente a una estación del Sistema de Transporte Colectivo-METRO.

Con este entorno, que provoca elevados niveles de ruido, se afectan las condiciones de los usuarios en sus actividades dentro de las instalaciones, aspecto no considerado desde la planeación del inmueble, como lo muestran las imágenes de la figura 1, donde las vialidades y el METRO, ya eran parte de la estructura urbana antes de su construcción.




*Figura 1.* Evolución de la estructura urbana del sitio de estudio posterior al emplazamiento del inmueble (del año 2000 al 2012). Fuente: Google Earth *[5]*

## METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo de investigación es la evaluación cualitativa y cuantitativa del problema en la edificación para demostrar su vulnerabilidad acústica. Para ello se realizó por un lado la evaluación de la percepción y la molestia de los usuarios por la intrusión del ruido ambiental en aulas (durante horarios hábiles) aplicando una encuesta y por el otro se elaboraron mapas de ruido por medio de un *software* de simulación (CadnaA) con base en aforos vehiculares obtenidos en campo en tres horarios representativos durante una semana (7:00 hrs, 13:00 hrs y 19:00 hrs). Finalmente se realizaron mediciones de las condiciones acústicas al exterior del edificio con el equipo Noise Tutor (Modelo 0163) y las condiciones acústicas al interior con un equipo Nor-140 de Norsonic, de acuerdo a lo estipulado en la ISO 140-5[3]. Para el análisis se consideraron normas internacionales, las que se estipulan en cada caso.

### Evaluación cualitativa – Aplicación de encuesta

Se aplicó la encuesta, con la finalidad de conocer la percepción que tienen los alumnos y académicos acerca del problema de ruido en el Instituto, de cuyos resultados se destaca que:

- El 43% considera que el ruido proveniente del exterior se genera por el tráfico vehicular.
- El 65% considera como “Muy molesto” el ruido proveniente de los exteriores y un 35% son “Indiferentes”.
- El 56% considera que “Muy frecuentemente” se le dificulta entender la clase o alguna conversación y el 39% considera que solo “en algunas veces”.
- El 72% evitan el ruido cerrando puertas y ventanas (lo cual genera problemas de ventilación y sobrecalentamiento en aulas ocupadas). Mientras los demás ignoran el ruido, escuchan música o utilizan audífonos.
- El 42% mencionan que el ruido les genera irritabilidad “muy frecuentemente”, seguido del 34% en un nivel “regular”, y el 29% en un nivel “poco, muy poco y nunca”.
- El 36% de los encuestados coincidió que después de su jornada escolar se siente cansado, mientras que el 17% presenta dolor de cabeza, siguiéndole en un 16% de los encuestados con irritabilidad.

En la siguiente figura (Fig. 2) se muestra gráficamente un resumen de los principales resultados de la aplicación de esta evaluación.

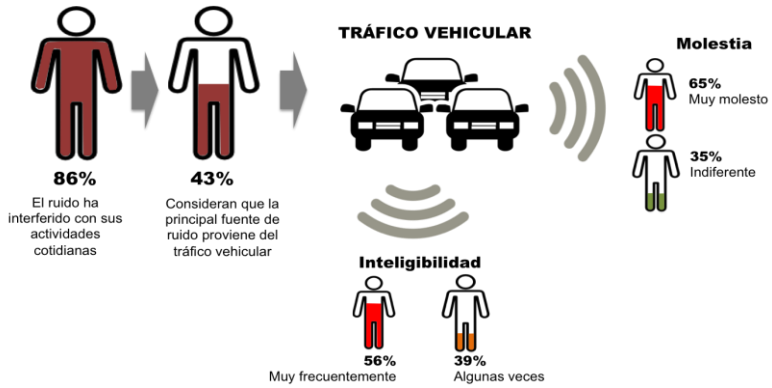



***Figura 2.*** *Resultado de percepción sonora de los usuarios, obtenido a través de las encuestas. Fuente: Propio*

[3] ISO 140-5 *Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements- Part 5: Field measurements or airborne sound insulation of facade elements and facades.*

**Evaluación acústica: evaluación urbana y de la edificación.**

### a) Evaluación urbana

Para realizar la evaluación urbana se construyeron mapas de ruido de la zona con objeto de conocer el impacto real del entorno acústico del tráfico vehicular en el edificio. Los resultados obtenidos (Figura 3a y 3b) muestran que el Instituto en promedio se encuentra inmerso entre los 70 y 80 dBA. Los grandes aforos vehiculares de las vialidades que llegan a ser hasta de 5,500 vehículos por hora, afectan la totalidad del predio, teniendo niveles muy por arriba del límite establecido para su uso [6]. La configuración espacial también es importante, ya que se puede observar que la zona donde se ubica el edificio, se encuentra rodeada de vialidades, con una configuración aislada y sin barrera alguna, afectando esto la totalidad del espacio.

Por otra parte los niveles sonoros presentes alrededor del terreno a lo largo del día son estables y puede considerarse (por la forma del terreno y la cercanía que éste tiene con las vialidades aledañas) que el impacto sonoro sobre el edificio es directo por cada uno de sus flancos, así los niveles sonoros equivalentes en áreas exteriores del edificio (áreas verdes) son de entre 75 y 70 dBA (Figura 3b).

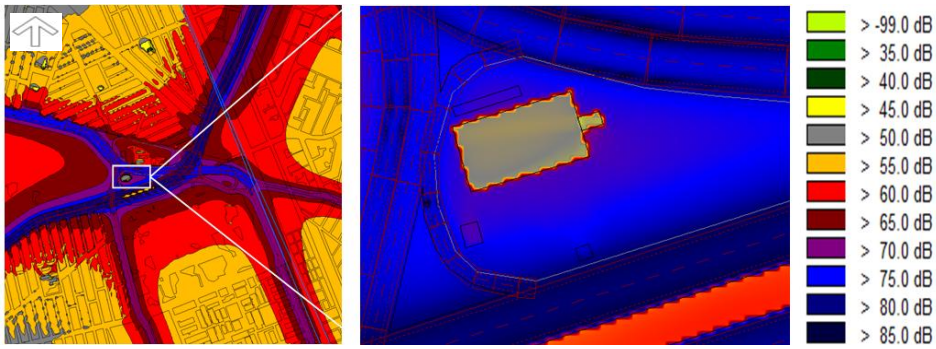



*Figura 3.* Mapa de ruido a) área de estudio, b) Terreno y edificación. Fuente: Elaboración Propia.

Se realizó un análisis que muestra que los niveles sonoros de día ($L_d$ en dBA) sobrepasan el límite establecido para el uso de suelo (Habitacional, Educación y Cultura) en el que se encuentra el edificio, siendo el límite ideal de 43 dBA [5]. La figura 4a muestra los niveles que exceden el límite establecido y en la ilustración 4b el mismo caso pero agregando una barrera acústica a todo el perímetro del terreno.

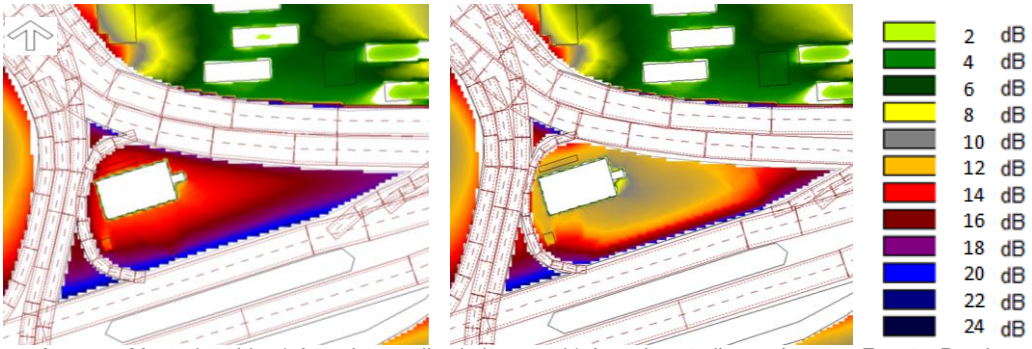



***Figura 4***. Mapa de ruido a) área de estudio sin barrera, b) área de estudio con barrera. Fuente: Propio.

Esta comparación muestra que al agregar una barrera acústica, el ruido ambiental disminuye hasta en 4 dBA, sin embargo este cambio no es suficiente para que las condiciones del edificio mejoren y se acerquen a las condiciones ideales para un edificio cuyo uso es la educación.

**b) Evaluación del edificio**

La calidad acústica, centrada en el mensaje oral, adquiere mayor importancia en este caso debido al uso de los espacios del edificio, principalmente destinados a la enseñanza, por lo que podría considerarse al edificio y su conjunto como de "USO PROTEGIDO".

Las normas internacionales que dictan los requerimientos para el diseño acústico de escuelas [7] establecen que el nivel de ruido de fondo recomendado al interior es de 35 dBA y la reverberación entre 0.6 o 0.7 s. Normas nacionales como la NMX-R-060-SCFI-2013 [4] para especificaciones en ventanas "sugiere" que el nivel interior máximo recomendado para aulas es de 40 dBA.

Esta norma sugiere también que la atenuación acústica ($R_A$) (requerida en ventanas) de acuerdo al $L_d$ del sitio (más de 70 dBA y menor de 75 dBA) debe ser de 35 dBA para aulas y 30 dBA para oficinas, misma que concuerda con la norma europea [8] que establece que las condiciones de aislamiento en fachadas (como compuesto) entre un recinto protegido y el exterior ($D_{2m,nT,Atr,}$) en función del $L_d$ en el sitio será de 37 dBA.

Al considerar las condiciones externas del edificio y al compararse con la situación medida en sitio, puede observarse que la diferencia entre las condiciones simuladas (Figura 3b) y las medidas en sitio (Tabla 1) son cercanas, lo mismo sucede con los valores percentiles, ya que entre los valores máximos como el $L_{A10}$ y los valores de ruido de fondo $L_{A50}$ existe una diferencia apenas perceptible (3 dBA).

En las mediciones en sitio puede observarse que la fachada SE es la que menor impacto tiene con relación a las demás (esto se relaciona por el horario en que se efectuó la medición 13:00 horas) ya que el impacto sobre esta fachada es por la mañana (7:00 a 9:00 hrs debido al sentido del flujo del tráfico) aun así las fachadas restantes presentan poca variación (alrededor de 2 dBA) por lo que se podría afirmar que son similares y estables a lo largo del día.

**Valores de nivel sonoro[1] promedio medido en sitio**

| Mediciones en exteriores[2] | | | | | Medición en interior | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | *Cancel cerrado* | | | | *Cancel abierto* | | | |
| | $L_{Aeq}$ | $L_{A10}$ | $L_{A50}$ | $L_{A90}$ | | $L_{Aeq}$ | $L_{A10}$ | $L_{A50}$ | $L_{A90}$ | $L_{Aeq}$ | $L_{A10}$ | $L_{A50}$ | $L_{A90}$ |
| *Fachada frontal SE* | 69.2 | 70.9 | 68.8 | 67.1 | *Planta baja* | 51.6 | 53.4 | 49.3 | 46.7 | 60.8 | 61.8 | 58.5 | 55.7 |
| *Fachada lateral derecha E* | 71.4 | 73.3 | 70.0 | 68.1 | *Primer nivel* | 52.7 | 54.4 | 51.7 | 49.7 | 64.1 | 65.7 | 62.9 | 60.6 |
| *Fachada trasera NO* | 71.1 | 73.5 | 69.2 | 66.6 | *Segundo nivel* | 53.3 | 55.1 | 52.1 | 49.7 | 64.9 | 66.6 | 64.1 | 61.4 |
| *Fachada lateral izquierda O* | 72.0 | 73.4 | 70.5 | 67.6 | *Tercer nivel* | 56.5 | 57.5 | 54.9 | 52.8 | 66.0 | 67.8 | 65.4 | 62.3 |

[1] En ponderación A. [2] Medido a 2m de fachada a 4m de altura.

***Tabla 1***. Valores de niveles sonoros promedio medidos en sitio.

Al interior del edificio se puede observar que el impacto sonoro aumenta con relación a la altura, de acuerdo a esto la planta baja será la de menor impacto y el tercer nivel el de mayor impacto (6 dBA mayor); así el impacto sonoro será de entre 52 y 57 dBA con ventanas cerradas y de entre 61 y 66 dBA promedio en condición de ventanas abiertas (que es como generalmente se utiliza el espacio debido a las condiciones térmicas que éste presenta). Al compararse estos datos con los límites permisibles antes mencionados [4][7][8] puede deducirse que los niveles de ruido de fondo sobrepasan los valores recomendados para ruido de fondo en instalaciones educativas.

***Medición de aislamiento acústico a ruido aéreo (por tráfico vehicular)***

Al analizar las propiedades de la fachada se consideró para el estudio un aula tipo de la edificación con las siguientes características: recinto de 163.30 $m^3$ expuesto a ruido aéreo por transmisión directa; a través de un sistema de fachada (cancel y celosía de rejilla metálica) de 18.79 $m^2$.

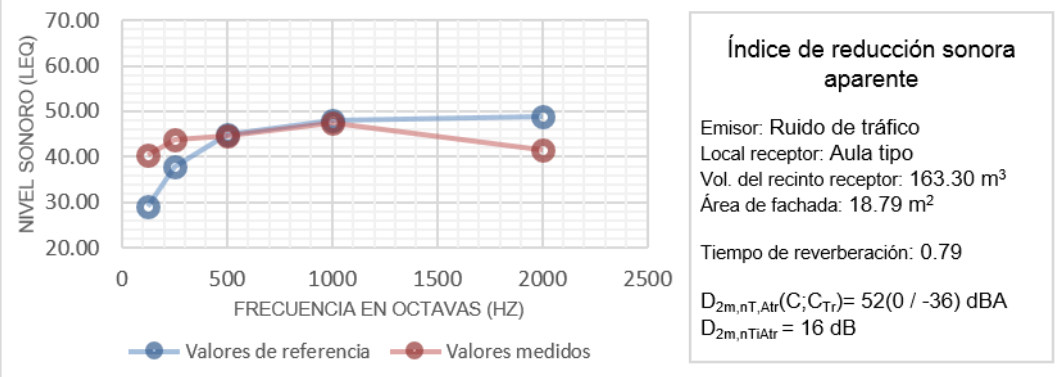



*Figura 5.* Índice de reducción sonora aparente de acuerdo con la Norma ISO 140-5 y Norma 717-1 [4]

Al realizar la comparación de los valores de aislamiento acústico en fachada mediante el parámetro $D_{2m,nT,Atr,}$[5] con los niveles deseables según normas internacionales [6] y de acuerdo al $L_d$, de entre 70 y 75 dBA, el nivel calculado debiera ser mayor o igual a 42 dBA, mientras que en el sistema de fachada actual el nivel de reducción sonora es únicamente de 16 dBA (Figura 5), por lo cual se infiere que no cumple las características básicas de protección al usuario y existe una interferencia con la calidad acústica de los espacios.

## CONCLUSIONES

El caso de estudio presentado es una muestra clara del problema que existe en México debido a la ausencia de una normativa encauzada a la protección acústica de los edificios. Donde se presentan dos ausencias trascendentales:

- La de **un criterio adecuado para la planeación y selección de la ubicación** de una institución educativa.
- La de c**riterios urbano-arquitectónicos adecuados** para el diseño de una edificación destinada a la educación en un entorno acústicamente hostil.

De esto se desprende que es necesario:

- Desarrollar una normativa de carácter urbano que integre el análisis de entornos acústicos, a la planeación y el diseño de edificaciones en general, y en especial de equipamientos urbanos sensibles.
- Desarrollar una normativa clara, proveniente de las instituciones públicas relacionadas con los sectores sustantivos (salud, educación y vivienda), que se enfoque en criterios de diseño y evaluación de sus edificios e instalaciones, considerando la contaminación acústica.

[4] La curva de referencia de espectro N°2.
[5] Que establece la diferencia de presión acústica ponderada en fachadas y cubiertas a ruido de tráfico y aeronaves

- Incluir dentro de los reglamentos de construcción la obligatoriedad de aislar acústicamente todas las edificaciones, que así lo requieran, para la obtención de niveles de salud y bienestar, en especial en edificaciones de alta sensibilidad acústica como son los hospitales, las escuelas y la vivienda.

Así, se puede decir que la principal problemática sobre las regulaciones en México en materia de ruido es la falta de legislación y de una política ambiental, así como la ausencia del cumplimiento y vigilancia de las normas existentes que regulan emisiones de ruido.

Es de suma importancia la creación y la actualización de reglamentos y normas, que incluyan medidas estrictas y consideren estrategias de vigilancia para asegurar condiciones sonoras que no dañen a la salud y el bienestar de las personas, y los seres vivos en general.

Falta aún mucho por hacer en materia de ruido ambiental en la ciudad de México y en general en el país, aun así no se debe olvidar que existen herramientas ya elaboradas (como normas [1][3][4] y el mapa de ruido), las cuales deben continuar su desarrollo para lograr una política general que enfrente este problema, que como ya se ha comprobado, afecta seriamente a la población.

## Agradecimientos y créditos

*El autor agradece a CONACYT el apoyo a la investigación denominada “El ruido ambiental en el espacio urbano de la ciudad de México: problemas y modelos de solución”, a través del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, de la que este trabajo es uno de sus productos, en una primera etapa.

Se agradece también la participación de autoridades, alumnos y profesores del ITGAM en el levantamiento de encuestas y de aforos vehiculares para el caso de estudio, así como del equipo de alumnos y profesores del Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico de la UAM Azcapotzalco, en las mediciones acústicas realizadas.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] **NADF-005-AMBT-2013** (2013). *Norma Ambiental para el Distrito Federal.* Gaceta Oficial del Distrito Federal. Recuperado en febrero 2015 de: http://www.consejeria.df.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/004f4d61c8a192fb8005549ab4ef0f5b.pdf

[2] **Rodríguez-Manzo, Fausto; Garay-Vargas, Elisa; Lancón-Rivera, Laura** (2013). *Estudio de impacto del ruido por tráfico vehicular en las delegaciones y barrios de la ciudad de México: el caso de la Delegación Azcapotzalco.* **España.** Teniacústica.

[3] **NOM-081-SEMARNAT**-1994 (1994).*Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición*. Recuperado en agosto 2015 de: http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/nom-ruido

[4] **NMX-R060-SCFI-2013** (2013). V*entanas y productos arquitectónicos para el cerramiento exterior de fachadas – clasificaciones y especificaciones.* Secretaría de Economía, México.

[5] **Google Earth (2015).** Recuperado en julio de 2015 en: https://earth.google.com

[6] **Berglund, B.; Lindvall, T.; Schwela, D.,** (1995). *Guidelines for community noise.* Estocolmo: Organización Mundial de la Salud (OMS).

[7] American **National Standard (ANSI)**, (2002). *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools*. Acoustical Society of America, E.U.A.

[8] **Documento Básico HR** (2009). Protección frente al ruido: 2-4. Recuperado en julio de 2015 de: *www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/0155F82F-4091-40A0.../15.pdf*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LAS LANAS MINERALES Y EL DB-HR

PACS: 43.15.+s

**Peinado Hernández, Fernando**[1] *(fernando.peinado@saint-gobain.com)*
**Bermejo Presa, Nicolás**[1] *(nicolas.bermejo@saint-gobain.com)*
[1]Saint-Gobain Isover Ibérica, S.L.
Av. del Vidrio s/n, 19200 Azuqueca de Henares (Guadalajara- Spain)

## RESUMEN

Las características de los productos utilizados en edificación y que contribuyen a la protección frente al ruido se indican en el punto 4.1, Características exigibles a los productos, del Documento Básico Protección frente al ruido, DB-HR.

Las lanas minerales son excelentes absorbentes acústicos, y por ello, resuelven eficazmente los problemas de acondicionamiento y aislamiento acústico de los recintos en los edificios.

En este trabajo se exponen brevemente las propieades acústicas de las lanas minerales, así como la influencia de distintos factores en la efectividad acústica de las soluciones constructivas que incorporan lanas minerales.

## LANAS MINERALES

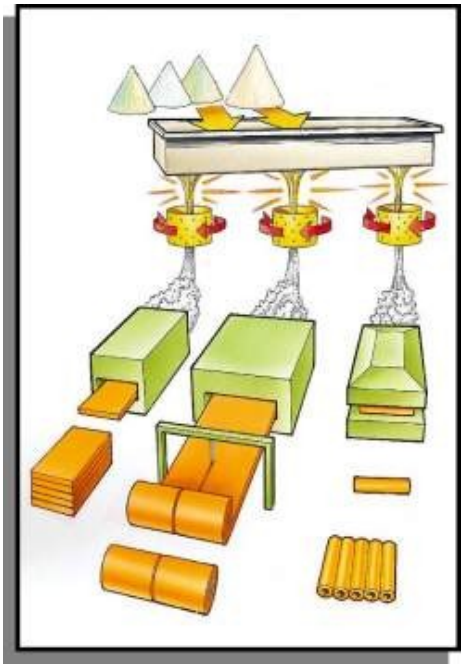
### 1. Definición

Según la norma de producto EN 13162, *Productos manufacturados de lana mineral (MW), Especificación,* las lanas minerales son materiales o productos aislantes de consistencia lanosa obtenidos por fusión de roca (minerales basálticos/volcanicas) o vidrio (arenas silíceas) .

Las lanas minerales tienen una estructura fibrilar, de porosidad abierta, con aplicaciones aislamiento térmico, absorbente/aislamiento acústico y protección pasiva frente al fuego.

Para su fabricación. las materias primas, una vez mezcladas, se introducen en el horno de fusión, y mediante la aportación de energía primaria, se obtiene la fusión de la mezcla a altas temperaturas.

El fundido se estira mecánicamente para la generación de la lana, y finalmente, mediante polimerización y corte, transformarlo en los productos comerciales, en forma de rollos, paneles o elementos modeados.



## 2. Propiedades acústicas

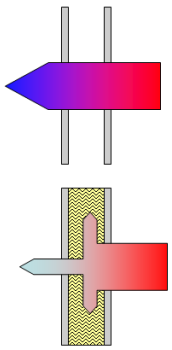
Según el apartado 4.1 del CTE DB-HR, los productos destinados en edificación y que contribuyen a la protección frente al ruido se caracterizan por:

- La resistividad al flujo del aire, r, en kPa.s/m$^2$, obtenida según UNE EN 29053, y la rigidez dinámica, s', en MN/m$^3$, obtenida según UNE EN 29052-1 en el caso de productos de relleno de las cámaras de los elementos constructivos de separación.

  La resistividad al flujo del aire, r, es la capacidad que tienen los productos de reducir la energía acústica trasmitida, disminuyendo la velocidad del sonido dentro del mismo.

  La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente: 340 m/s.

  La velocidad del sonido en las lanas minerales es de aproximadamente: 180 m/s.



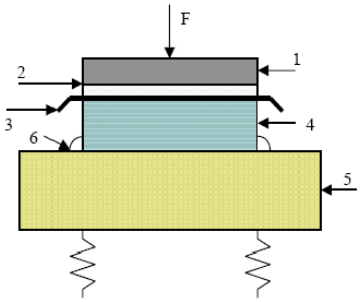
- La rigidez dinámica, s', en MN/m$^3$, obtenida según UNE EN 29052-1 y la clase de compresibilidad, definida en sus propias normas UNE, en el caso de productos aislantes de ruido de impactos utilizados en suelos flotantes y bandas elásticas.

La rigidez dinámica, s', indica la capacidad del mismo para actuar como un muelle y consecuentemente, su capacidad para actuar como amortiguador acústico. Por esta razón, la rigidez dinámica es uno de los parámetros que determina el aislamiento acústico de materiales a ruido de impacto.

*dónde:*

*S: es la superficie de la muestra.*
*F: es la fuerza dinámica perpendicular a la muestra.*
*Δd: es el cambio dinámico resultante en el espesor del material elástico.*

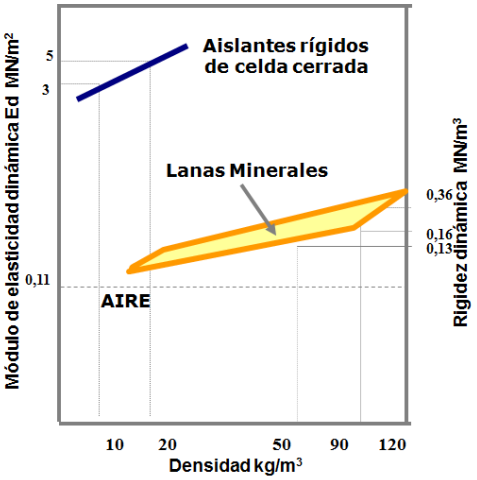
$$s' = \frac{F/S}{\Delta d}$$




Para las lanas minerales, la rigidez dinámica es:

$$S' = \frac{E_d}{d}$$

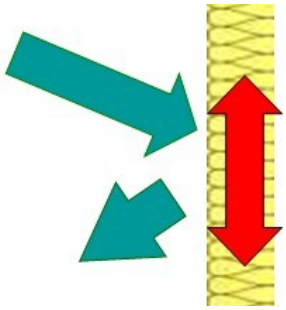
**S´ Rigidez dinámica del material (MN/m³)**
**$E_d$ Módulo de elasticidad dinámica (MN/m²)**
**d Espesor del material (m)**



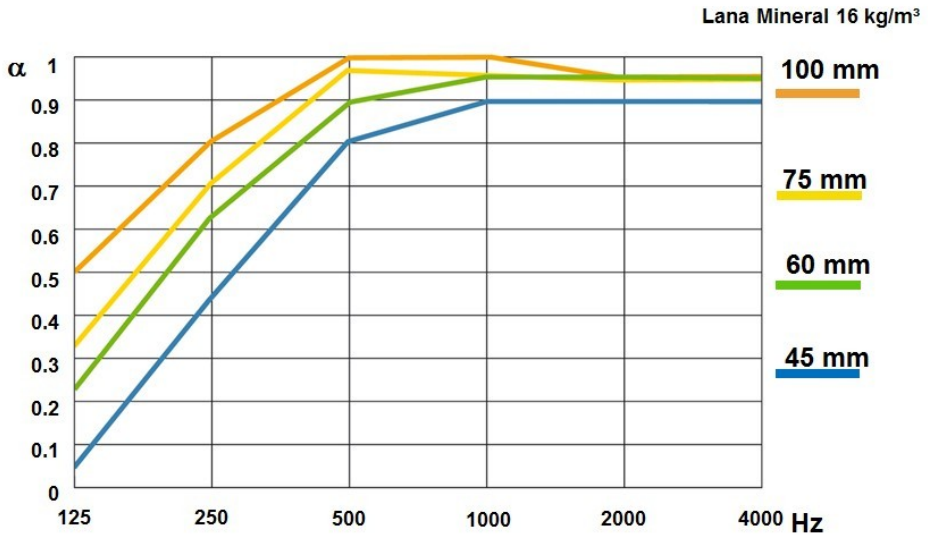

- El coeficiente de absorción acústica, α, al menos, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz y el coeficiente de absorción acústica medio $\alpha_m$, en el caso de productos utilizados como absorbentes acústicos.

El coeficiente de absorción acústica, α, es la capacidad de absorber parte de la energía acústica incidente en un material.

$$\alpha_S = \frac{\textbf{Energia absorbida}}{\textbf{Energia incidente}}$$



Para las lanas minerales, el coeficiente de absorción acústica depende fundamentalmente del espesor de los productos, y en menor medida de otros factores como pueden ser la densidad o el tipo de fibrado:




**Problemas acústicos**

**1. Acondicionamiento acústico**

Son aquellas técnicas aplicadas al interior de un local, o recinto, con el objetivo de disminuir el ruido interior y de optimizar la calidad acústica del mismo.

Estas técnicas consisten en aumentar la absorción acústica del interior de los locales, mediante la utilización de productos con un alto coeficiente de absorción acústica, consiguiendo reducir el tiempo de reverberación interior del local.

El tiempo de reverberación del local se puede medir o estimar mediante el algoritmo:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{A} \quad [s]$$

$$A = \sum S \cdot \alpha \quad [m^2]$$

$V$ = volume of the room $[m^3]$

$S$ = area of the different surfaces $[m^2]$

$\alpha$ = absorption of the different surfaces [-]

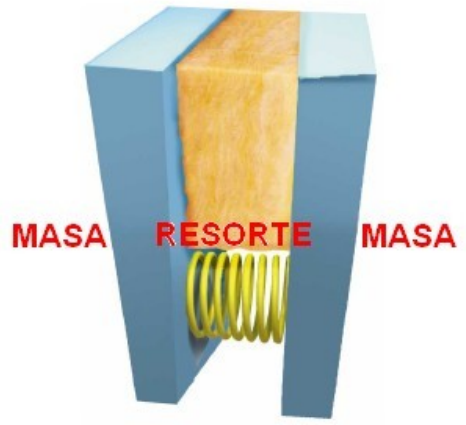
**2. Aislamiento acústico**

Es la capacidad de los cerramientos para reducir el ruido de inmisión, o de emisión, en un local a otro.

Pueden ser de dos tipos:

1. Ruido aéreo, origen y recepción en el aire.
2. Ruido estructural (o de impacto), origen en un medio sólido.

Los sistemas más eficaces para el aislamiento acústico entre recintos están formados por cerramientos de dos hojas con cámara rellena de un material altamente absorbente, como las lanas minerales, que funcionan acústicamente bajo el principio MASA-MUELLE-MASA.




La eficacia de estos sistemas se fundamenta en la ELASTICIDAD de las lanas minerales, definida por su baja RIGIDEZ DINÁMICA, s', medida en $MN/m^3$.

Los valores de la RIGIDEZ DINÁMICA, s', de las lanas minerales, disminuyen con la densidad del producto y con el aumento de espesor.

**FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA ACÚSTICA DE LOS CERRAMIENTOS**

**1. Influencia de la masa superficial del cerramiento**

Para un mismo tipo de cerramiento, cuanto mayor sea la masa superficial del mismo, mayor será el aislamiento acústico que aporta.



## 2. Influencia de la separación entre hojas y su relleno

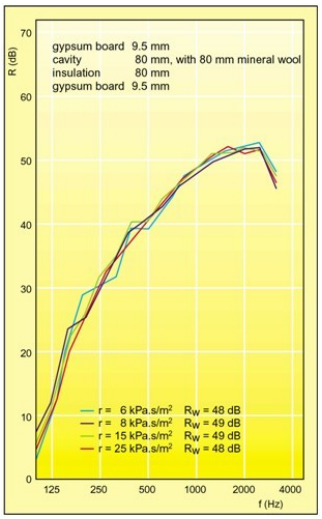
Cuanto mayor sea la separación entre las hojas, mayor será el aislamiento acústico aportado por la solución constructiva.

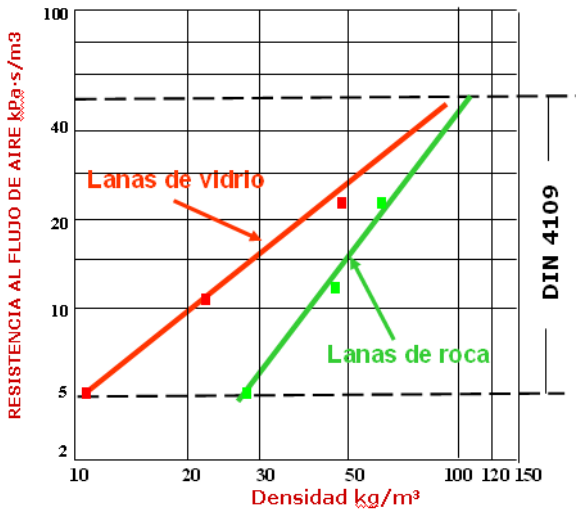


## 3. Influencia de la resistividad al flujo de aire de la lana mineral

La resistividad al flujo del aire de la lana mineral que rellena la cámara de un cerramiento, no presenta ventaja para el aislamiento acústico de los sistemas cuando su resistividad al flujo de aire, r, se sitúe entre los valores:

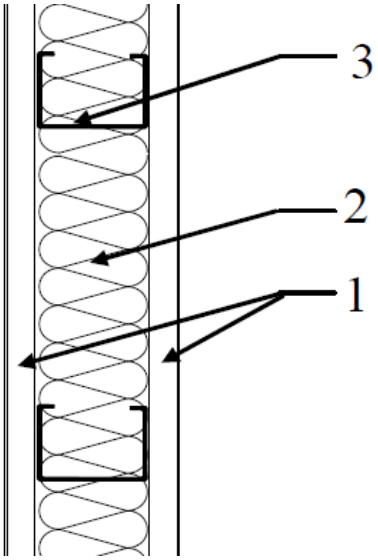
$$5\ kPa{\cdot}s/m^3 < r < 50\ kPa{\cdot}s/m^3$$

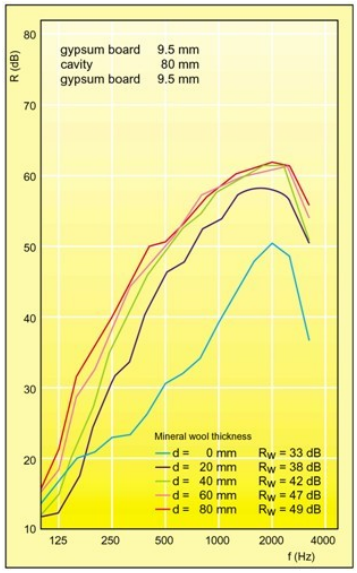


### 3. Influencia del espesor de relleno de lana mineral

Para una misma solución constructiva, cuanto mayor sea el espesor de la cámara rellenado con lana mineral, mayor será el aislamiento acústico aportado por la misma.




## CONCLUSIÓN

Las lanas minerales son excelentes absorbentes acústicos, y por ello, resuelven eficazmente los problemas de acondicionamiento y aislamiento acústico en los recintos de los edificios.

Para cada tipo de problemática se debe seleccionar el producto y la solución constructiva adecuada según las características acústicas y mecanicas requeridas para cada caso.

## REFERENCIAS

[1] CTE DB-HR : Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Protección Contra el Ruido.

[2] SAINT-GOBAIN (ISOVER). Guide de prescription de l´isolation thermique et acoustique .

[3] UNE-EN ISO 10140-1:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1. Reglas de aplicación para productos específicos. Requisistos para instalaciones y equipos de ensayo.

[4] UNE-EN ISO 10140-2:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Medición del aislamiento al ruido aéreo.

[5] UNE-EN ISO 10140-4:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción.Procedimientos y requisitos de medición.

[6] UNE-EN ISO 10140-5:2011: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo.

[7] UNE-EN ISO 3382-2:2008.

[8] UNE-EN ISO 717-1:1997: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

[9] UNE-EN ISO 717-1:1997/A1:2007: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. Modificación : Normas de redondeo asociadas con los índices expresados por un único número.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONDICIONES DE HABITABILIDAD Y REHABILITACIÓN ACÚSTICA EN LA VIVIENDA SOCIAL DE LA POSGUERRA ESPAÑOLA

PACS: 43.55.Rg

Monzón, Marta[1], Daumal, Francesc[2], López-Mesa, Belinda[1]
1.-Universidad de Zaragoza; Unidad Predepartamental de Arquitectura
María de Luna, Edificio Torres Quevedo, 50018 Zaragoza
2.- Universidad Politécnica de Cataluña; ETSAB (UPC)
Avda. Diagonal 649, 08028 Barcelona
Email: monzonch@unizar.es, francesc.daumal@upc.edu, belinda@unizar.es.

## ABSTRACT

The renovations carried out in dwellings to improve their acoustic behavior do not usually consider other conditions such as the reduction of space comfort. Some Autonomous Communities of Spain and Councils regulate different safety- and hygiene-related aspects, whose possible non-fulfilment due to acoustic renovation of social housing of Spain's postwar is studied in this paper.

## RESUMEN

Las rehabilitaciones realizadas en viviendas motivadas por cuestiones acústicas, no suelen tener en cuenta otras afecciones como la merma de la habitabilidad. Algunas Comunidades Autónomas y también los Consistorios tienen normativas de habitabilidad en que se regulan diferentes aspectos sobre las condiciones de seguridad e higiene, cuyo posible incumplimiento debido a la rehabilitación acústica de las viviendas sociales de la posguerra española se estudia en esta comunicación

## INTRODUCCIÓN

El periodo de la posguerra española se caracteriza por una escasez acusante de recursos económicos, un estado decadente del transporte en el país, y una limitación del uso del acero en la construcción marcada por la ley. Esto ha sido determinante en las condiciones de construcción de viviendas en este periodo.
La vivienda social tanto de promoción pública como de promoción privada, fueron viviendas modestas que se construyeron en muchas ciudades españolas para acoger la gran inmigración que se estaba produciendo desde el campo a las ciudades.
Estos edificios se levantaban en las afueras de las ciudades, formando barrios obreros. Son viviendas de pequeñas dimensiones que albergaban a familias completas, matrimonios con varios hijos, alojados en habitaciones de superficie ajustada.

Muchos de estos edificios que continúan hoy en pie, embebidos en el núcleo urbano, deben satisfacer las necesidades de sus actuales usuarios, que son diferentes a las de sus moradores originales. Las fuentes de ruido exteriores y los niveles de exigencia de los usuarios han cambiado, y muchos de ellos han podido tomar la decisión de realizar rehabilitaciones en las viviendas o edificios motivadas por problemas acústicos. Dado que hablamos de viviendas mínimas, dichas intervenciones pueden disminuir sus condiciones de habitabilidad, hasta el punto de no cumplir las normativas actuales al respecto y no poder obtener, en su caso, la cédula de habitabilidad.

Se analizan viviendas de dos Conjuntos Urbanos de la ciudad de Zaragoza, uno de 1956 y otro de 1975, que representan bien la evolución que siguieron estos conjuntos siguiendo los postulados de la arquitectura moderna, partiendo de muros de carga hacia la planta libre, lo que modifica las soluciones de fachada y repercute en su comportamiento acústico (1).

## MARCO JURÍDICO

### Normativa estatal de habitabilidad y la cédula de habitabilidad

El primer reconocimiento público de las "deplorables condiciones de la vivienda urbana" fue con la Real Orden de 1853 (2) a partir de entonces se crearon comisiones y leyes para fomentar la construcción de viviendas dignas para las familias con rentas bajas, unas con más existo que otras, que han ido cambiando de forma hasta nuestros días.

En 1937 se regula por primera vez la cédula de habitabilidad, por la Orden del 16 de marzo, y establecida en el decreto de 23 de noviembre de 1940, del Ministerio de Gobernación, que aparece como un mecanismo de control y garantía de las condiciones higiénicas mínimas de las viviendas. La última regulación estatal al respecto fue en 1972 por el Decreto 469 de 17 de febrero, diferenciando entre cédulas de primera ocupación y cédulas de segunda y posteriores ocupaciones (3). Este control que estaba en manos del Estado, se trasladó años más tarde a las Comunidades Autónomas (CCAA), dejando en sus manos la regulación y exigencia de este documento. Es por ello que en la actualidad algunas CCAA continúan regulando en este sentido y otras han eliminado la cédula de habitabilidad como garantía de cumplir unas condiciones mínimas higiénicas.

Las licencias de primera ocupación coexistieron con las licencias municipales de obras, siendo dos documentos obligatorios con el mismo fin pero diferente forma y tramitación. Esta duplicidad llevó en muchas ocasiones a que las segundas sustituyeran a las primeras. En el caso de la cédula de habitabilidad de segunda ocupación y posteriores, su existencia y exigencia dependen de la Comunidad Autónoma. En algunas se ha regulado al respecto y tienen una normativa de las condiciones de habitabilidad de las viviendas existentes específica. En otros casos, si bien se ha suprimido la figura de la cédula de segunda ocupación, las viviendas tienen que seguir cumpliendo unos mínimos en cuanto a condiciones higiénicas, siendo pues de aplicación la Orden de 29 de febrero de 1944, por la que se establecen las condiciones higiénicas mínimas que han de reunir las viviendas, publicada en el BOE número 61 de 1 de marzo de 1944. Las Comunidades Autónomas que han redactado documentos legales que suprimen la necesidad de expedir un certificado que garantice el cumplimiento de la normativa de habitabilidad, han suprimido el documento, la necesidad de expedir un certificado de cumplimiento de la normativa de habitabilidad, sin embargo sigue siendo preciso que tanto las viviendas nuevas como las existentes cumplan las condiciones de habitabilidad de rango estatal, por tanto, la Orden de 1944. En cuanto a las cédulas de primera ocupación, las CCAA han trasladado las competencias a los municipios, transformándolas en licencias de obras.

En 1954 se aprueba una Ley del 15 de julio, y posterior Reglamento en 1955, sobre viviendas de renta limitada, orientadas a fomentar y gestionar la construcción de "viviendas de renta limitada". En esta ley no se indican condiciones de habitabilidad, ni en el texto que la sustituyó donde se denominaban viviendas de protección oficial en 1963, por lo que son de aplicación las condiciones mínimas higiénicas de la Orden de 1944. En su primer párrafo leemos que ese texto indica "… las condiciones mínimas que han de reunir toda clase de viviendas, sea cual fuere la Entidad o Particular a quienes pertenecieron" (4).

Las condiciones mínimas higiénicas que regula la Orden de 1944 (5) se resumen en la Tabla 1, comparándolas con otras normativas autonómicas más recientes. Como se observa en la tabla, muchos de los criterios reguladores se han mantenido.

**Normativa autonómica**

**a) Aragón**

Aragón es una de las Comunidades Autónomas que derogó la cédula de habitabilidad. La de primera ocupación se derogó primero, por la Disposición adicional primera del Decreto 60/2009, de 14 de abril de Gobierno de Aragón, por el que se regula el Plan aragonés para facilitar el acceso a la vivienda y fomentar la rehabilitación 2009-2012 (6), y la de segunda ocupación después, por la Disposición final primera de la Ley 2/2014, de 23 de enero, de Medidas Fiscales y Administrativas de la Comunidad Autónoma de Aragón (7).

**b) Cataluña**

Cataluña, que regula la cédula de habitabilidad desde 1985, actualmente tiene en vigor el Decreto 141/2012, de 30 de octubre, por el que se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas y la cedula de habitabilidad. En el Anexo 2 de dicho Decreto se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas construidas antes del 11 de agosto de 1984, cuyo resumen puede ver en la Tabla 1 (8).

La superficie mínima de vivienda preexistente se establece en 20 $m^2$, sin embargo se admite como excepción superficies de entre 15 y 20 $m^2$ si la licencia de obras es anterior al 1 de febrero de 1984 y disponen de cédula de habitabilidad antes de entrada en vigor del Decreto 141/2012.

Regula la superficie útil de las piezas en superficie (metros cuadrados) y en dimensiones. Por ejemplo la sala –espacio de uso común- debe tener 10 $m^2$ o más y una anchura mínima de 1,40 metros en toda su longitud. Las habitaciones tendrán una superficie no inferior a 5 $m^2$, y además unas dimensiones tales que permita inscribir un cuadrado de 1,80 x 1,80 m en planta.

**d) Comunidad Foral Navarra**

En la Comunidad Foral de Navarra es obligatorio disponer de la cédula de habitabilidad en vigor para que la vivienda sea considerada como tal. En el Decreto Foral 142/2004, de 22 de marzo, y su modificación 5/2006 de 16 de enero, se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas en la Comunidad Foral de Navarra (9). Son condiciones mínimas obligatorias para viviendas nuevas, pero también para las ya construidas a su entrada en vigor, y se resumen en la Tabla 1.

De la misma forma que en Cataluña, se especifica superficie y dimensión mínima de las piezas. Por ejemplo, la cocina debe tener una superficie no inferior a 5 $m^2$, y debe poder inscribirse en su interior un rectángulo de 1,80 x 1,20 m. En la sala de estar o en el estar-cocina se podrá inscribir un círculo de 2 m de diámetro y tendrá una superficie mínima de 12 $m^2$. Si la vivienda tiene un dormitorio, éste deberá tener 8 $m^2$ y se podrá inscribir un cuadrado de 2 m de lado. Si la vivienda tiene más dormitorios, éstos tendrán una superficie útil no inferior a 6 $m^2$. La altura mínima de los elementos como marcos, dinteles, vigas, será de 1,90, y la altura media del local deberá ser superior a 2,10 m.

**e) Comunidad Valenciana**

El documento que regula las condiciones de habitabilidad en la Comunidad Valenciana se llama licencia municipal de ocupación, y está regulada por la Ley 3/2004, de 30 de junio, de la Generalitat, de Ordenación y Fomento de la Calidad de la Edificación (LOFCE). Es obligatorio, en el caso de edificios existentes, cuando se transmita la propiedad del edificio o vivienda, o cuando haya que hacer un contrato nuevo de electricidad, agua o gas.

La normativa en vigor que regula las condiciones de habitabilidad es el Decreto 151/2009 de 2 de octubre, del Consell, sin embargo para los edificios o viviendas existentes remite a los criterios y condiciones previstos en la normativa anterior, Decreto 286/1997, de 25 de noviembre, del Consell, y a su desarrollo en virtud de la Orden de 22 de abril de 1991 (10). Esta normativa considera viviendas existentes las ya construidas o con solicitud de licencia municipal de obras con anterioridad al 23 de septiembre de 1989.

De acuerdo a lo anterior, las viviendas existentes que quieran renovar la licencia de ocupación deberán cumplir las condiciones de habitabilidad que se exigen para esta tipología en la HD-91. En este texto se dice expresamente que no es de aplicación en la Comunidad Valenciana la Orden de 29 de Febrero de 1944 sobre Condiciones Higiénicas mínimas de las viviendas.

Las viviendas tendrán una superficie útil mínima de 30 $m^2$, y estará compuesta por dormitorio, baño, y otra habitación. Las viviendas-apartamento, que estarán compuestas por un baño y otro recinto, tendrán una superficie mínima útil de 24 $m^2$. Las viviendas dispondrán de un dormitorio de 10 $m^2$ y, si tiene más, éstos pueden ser de 6 $m^2$.

**f) Gobierno Vasco**

Mediante el Decreto 189/1997 de 29 de julio, se suprimió en el País Vasco la cédula de habitabilidad. Las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas que están en vigor actualmente se regulan en el Anexo IV del Decreto 317/2002, de 30 de diciembre, sobre actuaciones protegidas de rehabilitación del patrimonio urbanizado y edificado, y su corrección de errores del 7 de abril de 2003 (11). De hecho, en la página web de Visesa, Sociedad Pública adscrita al Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, informa que los usuarios de viviendas que carezca de alguna de las condiciones del Decreto y no se pueda subsanar esta carencia realizando obras de acondicionamiento, se consideran que cumplen el requisito de necesidad de vivienda (12).

El Decreto 317/2002, de 30 de diciembre, y su corrección de errores del 7 de abril de 2003 Contempla situación extremas donde las habitaciones no puedan dar al exterior y deban iluminarse a través de otra habitación.

| Superficie útil | Orden de 29 de febrero de 1944 | Normativa Cataluña | Comunidad Foral Navarra | Comunidad Valencia | Gobierno Vasco |
|---|---|---|---|---|---|
| Vivienda | - | 20 $m^2$ | - | 30 $m^2$ vivienda (1)<br>24 $m^2$ apartamento-vivienda (2) | 36 $m^2$ |
| Cuarto de estar | 10 $m^2$ | 10 $m^2$ | 9 $m^2$ (pudiendo inscribir un circulo de 2 m de diámetro) | 12 $m^2$ | 10 $m^2$ |
| Dormitorio principal (o dormitorio con dos camas) | 10 $m^2$ y 25 $m^3$ | 5 $m^2$ (pudiendo inscribir un cuadrado de 1,80m de lado) | 8 $m^2$ (pudiendo inscribir un cuadrado de 2 m de lado) | 10 $m^2$ | Dormitorio principal: 10 $m^2$<br>Dormitorio 2 camas: 8 $m^2$ |
| Dormitorio una cama (o dormitorio secundario) | 6 $m^2$ y 15 $m^3$ | | 6 $m^2$ | 6 $m^2$ | 6 $m^2$ |
| Cocina | 5 $m^2$ | - | 5 $m^2$ (pudiendo inscribir un rectángulo de 1,8m x 1,2m) | 5 $m^2$ | Cocina: 5 $m^2$<br>Cocina-comedor: 8 $m^2$ |
| Cuarto estar + cocina | 14 $m^2$ | 14 $m^2$ (se estrangulamiento hasta 1,4m anchura) | 12 $m^2$ (pudiendo inscribir un circulo de 2 m de diámetro) | 14 $m^2$ | 18 $m^2$ |
| Retrete-aseo | 1,5 $m^2$ | - | 1,5 $m^2$ | | 1,5 $m^2$ |
| Anchura pasillos | 0,8 m.<br>Para la entrada anchura mínima 1 metro. | - | 0,70 m | 0,80 m (se permite estrangulamiento de 0,70m) | |
| Altura vivienda zona urbana | 2,50 m | - | 1,90 m en pasillos.<br>1,90 m en el resto de la vivienda, siempre que la media salga 2,1m. | 2,4 m, (permitiendo descuelgues hasta 2,2 que no llegue al 10% de la superficie).<br>2,2m en pasillo, aseo, cocina. | 2,2 m |

(1) Se considera vivienda las compuestas por dormitorio, baño y otra pieza según ORDEN de 22 de Abril de 1991 del Conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, por la que se aprueba la modificación y el texto refundido que desarrolla las normas de habitabilidad y diseño de viviendas en el ámbito de la Comunidad Valenciana.
(2) Se considera vivienda-apartamento las compuestas por baño y otro recinto según ORDEN de 22 de Abril de 1991 del Conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, por la que se aprueba la modificación y el texto refundido que desarrolla las normas de habitabilidad y diseño de viviendas en el ámbito de la Comunidad Valenciana.

**Tabla 1.** Condiciones higiénicas establecidas en algunas de las normativas en vigor del territorio nacional.

## REHABILITACIÓN ACÚSTICA Y CASO DE ESTUDIO

La rehabilitación de edificios motivada por problemas acústicos tanto a nivel particular como a nivel de bloque, conlleva unas modificaciones en las viviendas que pueden afectar a sus condiciones de habitabilidad. La disminución de la superficie útil de las habitaciones o la reducción de la altura libre de la vivienda pueden suponer el incumplimiento de las condiciones mínimas fijadas por las diferentes regulaciones de las Comunidades Autónomas, evitando la expedición, en su caso, de la cédula de habitabilidad.

### Trasdosado de una pared y colocación de techo suspendido

El ruido entre vecinos o el ruido procedente del exterior cuando la parte ciega de fachada es un elemento débil acústicamente, se solventa mediante la colocación de un trasdosado en la pared o en la fachada. Para conseguir buenas propiedades acústicas, realizaríamos preferentemente un trasdosado autoportante que, atendiendo a una solución estándar adoptada por el Catálogo de Elementos Constructivos, tendrá el espesor que se indica en la Tabla 2.

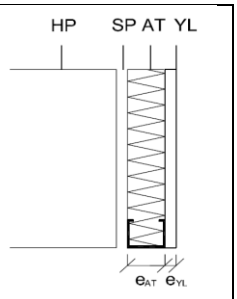
| | Opción 1 Espesor (mm) | Opcion 2 Espesor (mm) |  |
|---|---|---|---|
| Placa de yeso laminado (YL) | 15 mm | 2 x 12,5 mm | |
| Espesor del Aislante (lana mineral-AT) | ≥50 mm | ≥50 mm | |
| Separación (SP) | ≥10 mm | ≥10 mm | |
| Total | ≥75 mm | ≥85 mm | |



**Tabla 2.** Espesores mínimos para trasdosados autoportantes, según CEC.

Con el objetivo de disminuir el ruido aéreo transmitido entre vecinos verticales, se colocan techos suspendidos. El Catálogo de Elementos Constructivos contempla la colocación de techos de placa de yeso laminado y techos de escayola, con las dimensiones mínimas que se especifican en la Tabla 3.

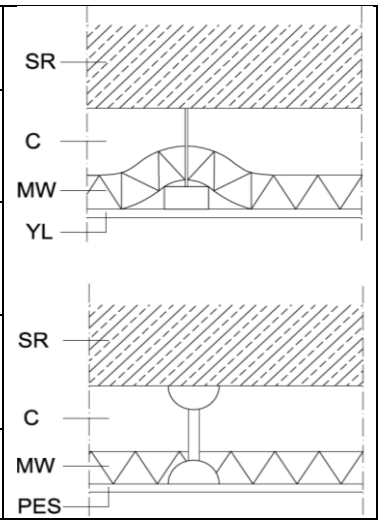
| | Opción 1 PYL Espesor (mm) | Opcion 2 PYL Espesor (mm) | Opcion 3 escayola Espesor (mm) | |
|---|---|---|---|---|
| Placa de yeso laminado (YL) o Escayola (PES) | 15 mm | 2 x 12,5 mm | 16 mm |   |
| Espesor del Aislante (lana mineral-AT) | ≥50 mm | ≥50 mm | ≥80mm | |
| Cámara de aire (C) | ≥100mm | ≥100mm | ≥120mm | |
| Total | ≥ 165 mm | ≥175mm | ≥216mm | |

**Tabla 3.** Espesores mínimos para techos suspendidos, según CEC.

Sin entrar en los beneficios acústicos que proporcionan unas u otras soluciones, atendemos únicamente a la reducción de superficie útil o de altura libre que produciría una solución estándar de este tipo. Un trasdosado autoportante realizado a un elemento de separación vertical tendrá un espesor mínimo de 75 u 85 mm, y reducirá la superficie de la habitación en consecuencia. Un techo suspendido reducirá la altura libre de la vivienda un mínimo de 16,5 cm con placa de yeso laminado, y de 21,6 cm escogiendo la solución de escayola.

Dicho trasdosado se puede poner para aislar acústicamente una habitación de nuestra vivienda del vecino colindante o del ruido exterior, o en ambos casos. Esto afecta tanto a la reducción de la superficie de la habitación como a su dimensión lineal que en algunas normativas se exige un valor mínimo.

**Grupo Girón Fase 2, Zaragoza**

En la Figura 1 se muestra un plano en planta de un edificio de viviendas del Conjunto Urbano de Interés de Zaragoza Grupo Girón Fase 2, del año 1956, y su posible rehabilitación por motivos acústicos. Las viviendas tienen unas dimensiones comprendidas entre 37 y 48 $m^2$. Las de la planta baja, tipo C3b1, tienen menores dimensiones que las de plantas alzadas debido al espacio que ocupa el zaguán de entrada al edificio. Las viviendas están compuestas por salón-cocina en una sola pieza, un dormitorio principal de cama doble, dos dormitorios secundarios los cuales en origen estaban destinados a albergar dos camas cada uno, y un baño. El dormitorio principal tiene unas dimensiones de 2,55 metros por 3,16, que hacen una superficie de 8,06 $m^2$. Dicha superficie no cumple las dimensiones mínimas establecidas por la Orden de 29 de febrero de 1944, que es de aplicación en algunas CCAA como Aragón, ni tampoco otras normativas de habitabilidad autonómicas como las de Comunidad Valenciana y País Vasco. En el caso de que dicha vivienda se encontrase en Cataluña o Navarra, sí cumpliría con los requisitos normativos en este aspecto. La colocación de un trasdosado en este dormitorio para aumentar el aislamiento acústico con la vivienda contigua, disminuiría su superficie a 7,80 $m^2$.

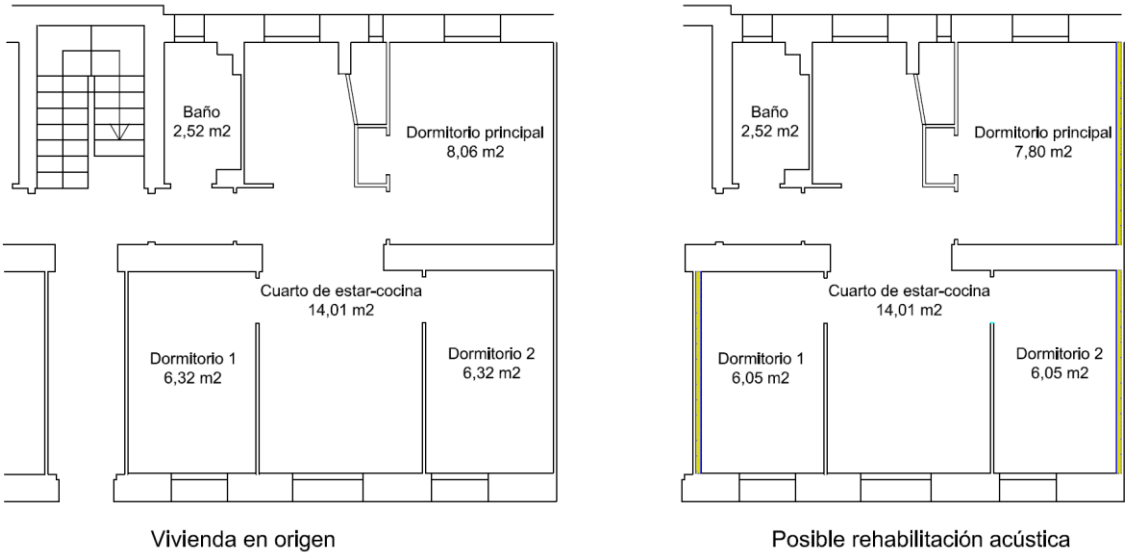



**Figura 1**. Planta viviendas del Grupo Girón Fase 2 de Zaragoza. Origen y posible rehabilitación por motivos acústicos.

Los dormitorios secundarios tienen unas dimensiones de 2 metros por 3,16, resultando una superficie útil de 6,32 $m^2$. Las dimensiones de estos dormitorios, en caso de albergar una sola cama, cumplirían las condiciones de habitabilidad de todas las Comunidades estudiadas. Una factible intervención por motivos acústicos sería trasdosar el dormitorio secundario con la zona común del edificio, o con la vivienda contigua. Si aplicásemos un trasdosado a la pared de separación, la anchura de la habitación se reduciría, aplicando uno de los trasdosados contemplados anteriormente, 8,5 cm, resultando una anchura de la habitación de 1,915 m. Dicha dimensión por la longitud que permanecería constante, 3,16 m, hacen un total de 6,05 $m^2$, cumpliendo las normativas de habitabilidad.

La fachada de este Conjunto en planta baja es a base de muro de carga, por lo que el aislamiento acústico de la parte ciega de la fachada es suficiente y no procede un trasdosado.

La Orden de 1944 establece un volumen mínimo de 15 $m^3$ para el dormitorio secundario. La altura de las viviendas del Grupo Girón es en 2,5 m, por tanto, si se colocase un techo suspendido en las habitaciones, no cumpliría el volumen mínimo exigido. Un techo suspendido disminuiría como mínimo 16,5 cm la altura libre, dejando 2,33 m. El volumen en una habitación de 6,05 $m^2$ sería 14,13 $m^3$, valor inferior al exigido por la norma. Para el caso de esta intervención en el dormitorio principal, el volumen resultante es de 18,17 $m^3$, inferior al requerido.

En dichas viviendas, el salón cocina tiene una superficie de 14,01 $m^2$, por lo que no aceptarían ningún trasdosado para reducir la transmisión de ruido con viviendas anexas, excepto si se encontrasen en el País Vasco. Respecto a la altura libre de la vivienda, el techo suspendido mínimo según el CEC es de 16,5 cm, que, de instalarlo en esta vivienda, dejaría una altura de 2,33 cm. En consecuencia, solo estaría permitido en Cataluña, Navarra, País Vasco y en el pasillo, cocina y baño de la Comunidad Valenciana.

**Balsas de Ebro Viejo**

El proyecto del Conjunto Urbano de Balsas de Ebro Viejo es de 1964, y se construyó en 1975. En este caso la estructura ha evolucionado hacia los postulados de la arquitectura moderna, sustituyendo los muros de carga por sistemas de pilares, que permiten una fachada más ligera, y en consecuencia las prestaciones acústicas de aislamiento al ruido exterior son menores como se concluye en (1). Aquí, por tanto, se hace necesario el trasdosado de fachada, con la consecuente disminución de superficie útil de las habitaciones.

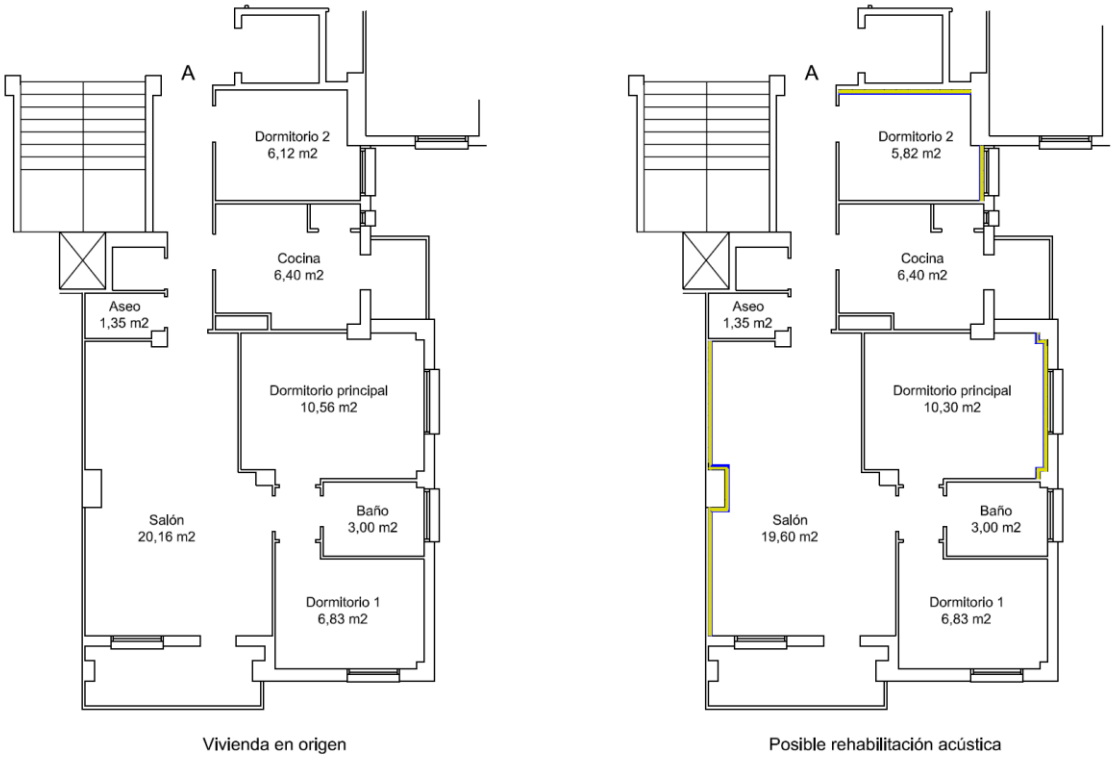



**Figura 2.** Plano viviendas de las torres del Conjunto Balsas de Ebro Viejo, Zaragoza.

La composición de los muros de fachada es, en su mayor parte, fábrica de ladrillo caravista con cámara de aire cerrada mediante tabique de fábrica de ladrillo hueco sencillo, con un aislamiento acústico a ruido aéreo $R_{A,tr}$ de 56 dB(A). Sin embargo, en algunas partes se sustituye la hoja exterior por fábrica de ladrillo hueco doble jaharrado con mortero, que tiene un aislamiento $R_{A,tr}$ de 44 dB(A) (1).

La fachada del dormitorio 2 de la vivienda que aparece representada en la Figura 2, el cual consideramos de una cama, tiene esta segunda composición. Un trasdosado en su fachada con motivos acústicos sería más que razonable. Dicha habitación está sometida también a los ruidos producidos por la caja del ascensor de la comunidad, pudiéndose minorar éstos mediante la colocación de un trasdosado en la pared de separación. Realizando estas dos intervenciones se reducirían las dimensiones de dicho dormitorio, como se indica en la Figura 2 y tal como se ha explicado en el apartado anterior, en 0,85 cm, resultando una superficie útil final de 5,82 $m^2$. Dicha superficie incumpliría las normativas de habitabilidad estudiadas excepto la de Cataluña.

En el caso de colocar un techo suspendido con objetivos acústicos en este dormitorio simple que tiene una altura libre de 2,60 m, la altura máxima resultante sería 2,43 m. El volumen sería, por tanto, 14,14 $m^3$, inferior a lo estipulado por la Orden de 1944. De colocar un techo suspendido en el dormitorio principal además de un trasdosado de fachada, el volumen sería como máximo 25,03 $m^3$, muy ajustado pero superior a lo exigido por la Orden de 1944.

Colocando este techo suspendido, la altura libre de la vivienda tampoco cumpliría lo indicado en dicha Orden, pero sí las normativas de las CCAA estudiadas.

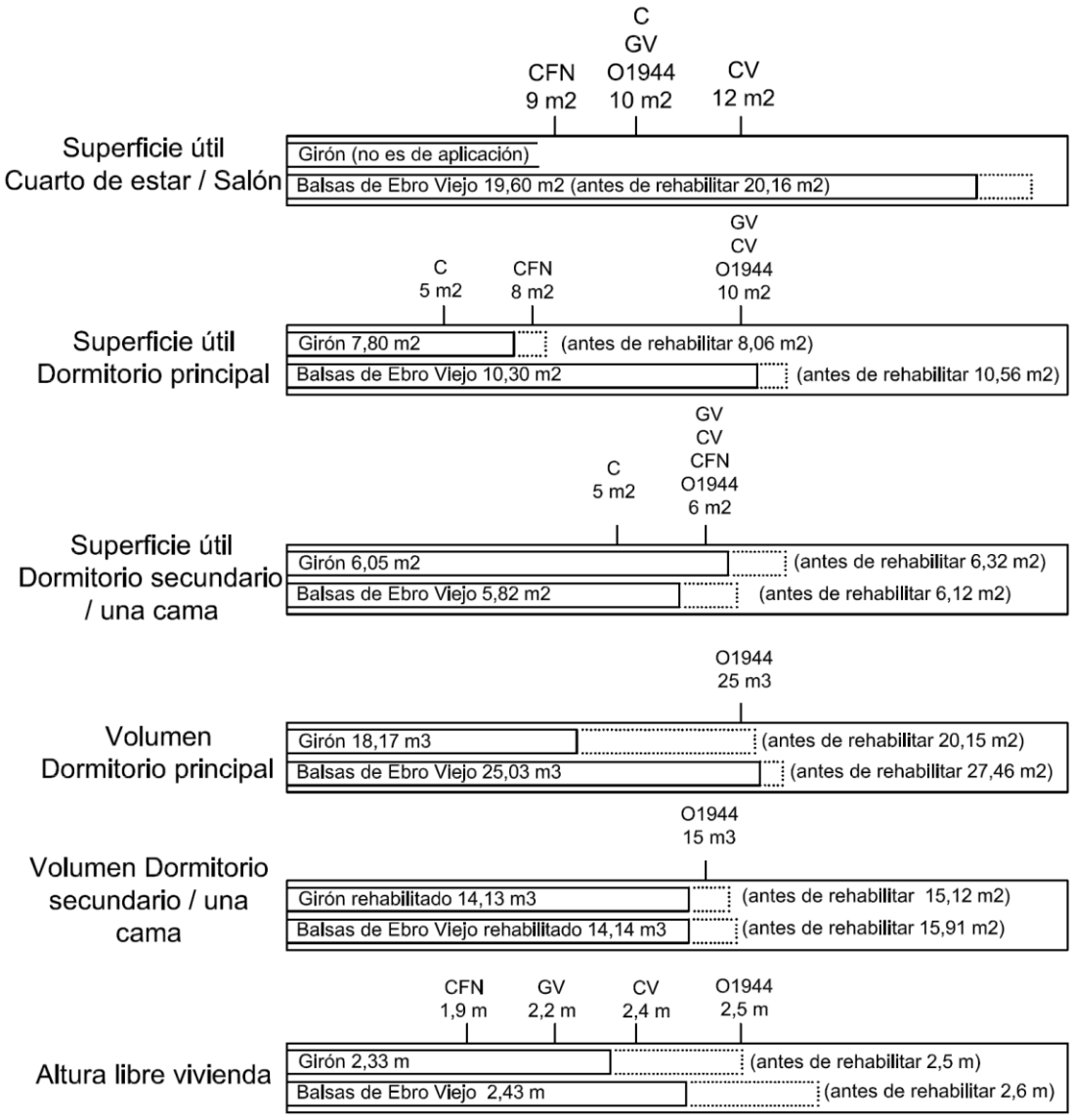



**Figura 4.** Cumplimiento de los diferentes requerimientos normativos. (O1944: Orden de 29 de febrero de 1944, por la que se establecen las condiciones higiénicas mínimas que han de reunir las viviendas. C: Cataluña. CFN: Comunidad Foral de Navarra. CV: Comunidad Valenciana. GV: Gobierno Vasco.)

## CONCLUSIONES

Las rehabilitaciones acústicas que buscan el aumento del aislamiento acústico de los paramentos, conllevan una disminución de la superficie útil o de la altura libre de las habitaciones donde se realizan. En el caso de las viviendas sociales de la posguerra española, donde las superficies de las viviendas son mínimas, puede conllevar el incumplimiento de la normativa de habitabilidad de aplicación y, en consecuencia, el no otorgamiento de la cédula de habitabilidad.

Las fachadas a base de muro de carga tienen unas altas prestaciones acústicas que hacen innecesario aumentar su aislamiento acústico, a excepción del hueco. Conforme dichas estructuras tienden a hacerse más ligeras, concentrando la transmisión de las cargas en pilares y pórticos, las fachadas siguen el mismo objetivo y, en muchas ocasiones, proporcionan insuficiente aislamiento acústico del exterior. En estos casos, la colocación de un trasdosado aumentará el aislamiento acústico en detrimento de la superficie útil, de por sí muy ajustada.

Otra intervención con motivos acústicos es la colocación de un techo suspendido en el interior de estas viviendas, la cual puede suponer el incumplimiento de la altura libre y del volumen de las habitaciones de las diferentes normativas de habitabilidad.

Las viviendas sociales de la posguerra española eran viviendas modestas, construidas con pocos recursos y en barrios periféricos. Hoy en día están embebidas en la trama urbana, sin haberse realizado, salvo casos aislados, rehabilitaciones y deben adaptarse a las necesidades de los usuarios actuales. Por esta razón pueden haberse llevado a cabo intervenciones por motivos acústicos, mermando la superficie útil de las habitaciones y disminuyendo la altura libre, incumpliendo las normativas de habitabilidad de las diferentes CCAA, con el consecuente no otorgamiento de la cédula de habitabilidad, en su caso.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

(1) Kurtz, F., Monzón, M., López-Mesa, B. (2015). Obsolescencia energética y acústica de la vivienda social de la postguerra española en áreas urbanas vulnerables. El caso de Zaragoza. Informes de la Construcción, 67(extra-1): m021, doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.062.
(2) Sambricio, C. (Ed.) (2003). Un siglo de vivienda social 1903-2003, tomo I. Madrid: Nerea.
(3) Ministerio de Vivienda (1972). Decreto 469/1972, de 17 de febrero, sobre simplificación de trámites para expedición de la Cédula de Habitabilidad.
(4) Ministerio de Vivienda (1954). Ley 15 de julio de 1954 sobre viviendas de renta limitada, y su Reglamento de 1955.
(5) Ministerio de Vivienda. Orden del 29 de febrero de 1944 por la que se establecen las condiciones higiénicas mínimas que han de reunir las viviendas.
(6) Gobierno de Aragón (2009). Decreto 60/2009, de 14 abril del Gobierno de Aragón, por el que se regula el Plan aragonés para facilitar el acceso a la vivienda y fomentar la rehabilitación 2009-2012.
(7) Presidencia del Gobierno de Aragón (2014). Ley 2/2014, de 23 de enero, de Medidas Fiscales y Administrativas de la Comunidad Autónoma de Aragón.
(8) Departamento de Territorio y Sostenibilidad (2012). Decreto 141/2012, de 30 de octubre, por el que se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas y la cedula de habitabilidad.
(9) Comunidad Foral de Navarra (2004). Decreto Foral 142/2004, de 22 de marzo, y su modificación 5/2006 de 16 de enero, se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas en la Comunidad Foral de Navarra
(10) Conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes (1991). ORDEN de 22 de Abril de 1991 del Conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes,por la que se aprueba la modificación y el texto refundido que desarrolla las normas de habitabilidad y diseño de viviendas en el ámbito de la Comunidad Valenciana.
(11) Departamento de Vivienda y Asuntos Sociales (2002). Proyecto de Decreto 317/2002, de 30 de diciembre, sobre actuaciones protegidas de rehabilitación del patrimonio urbanizado y edificado y su corrección de errores 2003.
(12) Visesa, Gobierno Vasco (julio 2015). Departamento de Empleo y Políticas Sociales. http://www.visesa.com/preguntas_detalle.asp?idioma=1&id_tema=22&id_contenido=7167&palabra=&paginaActual=5&origen

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS EM PORTUGAL RESPONSÁVEIS E RESPONSABILIDADES

PACS: 43.15.+s

R. J. F. Pereira[(1)]; Carlos César Rodrigues[(2)]
[(1)] Tecnoacústica - Medições Acústicas, Lda.; [(2)] Instituto Superior Engenharia Lisboa
[(1)] Estrada do Paraíso, Edifício Labisa, Bloco 1 - Loja D; Ferreiras; 8200-559 Albufeira; Portugal; Tel: (+351) 289543120; rui@tecnoacustica.pt
[(2)] Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel: (+351) 218317000; Fax: (+351) 218317162; crodrigues@adf.isel.pt

## ABSTRACT

Based on the paper "Acoustic assessment in Portugal - The prospect of an acoustic accredited laboratory", from the same authors, in which were discussed some of the current difficulties faced by the acoustic accredited laboratories, the authors decided to further discuss one of them in an exhaustive but rational way.

In fact, the recent changes in the building acoustics applicable legislation, namely Portaria nº 113/2015, demands clear and objective explanations, because if not, there is a huge risk that the supposed legal responsible do not assume their own responsibilities.

The authors will present proposals which, in their opinion, allow to clarify the inherent difficulties in the implementation of the current Portuguese building acoustics legislation.

## RESUMO

Tendo como base o artigo “A avaliação acústica em Portugal - A perspectiva de um laboratório acreditado em acústica”, dos mesmos autores, em que foram discutidas algumas das actuais dificuldades com que se deparam os laboratórios acreditados em acústica, entenderam os autores debater uma das questões levantadas de modo exaustivo e ponderado.

De facto, as recentes alterações na legislação aplicável a acústica de edifícios, designadamente a Portaria nº 113/2015, exigem esclarecimentos claros e objectivos, sob pena de os supostos responsáveis não assumirem as devidas responsabilidades.

Os autores apresentarão propostas que, em seu entender, permitem clarificar as dificuldades inerentes à aplicação da actual legislação sobre acústica de edifícios em Portugal.

## 1. INTRODUÇÃO

A recente alteração introduzida na legislação portuguesa, com repercussões determinantes na área da acústica, designadamente a Portaria nº 113/2015, de 22 de Abril (P113/2015), veio tornar, no mínimo, pouco clara a regulamentação que define os elementos necessários para a emissão de pedidos de autorização e de alteração de autorização da utilização.

A anterior portaria, Portaria nº 232/2008, de 11 de Março, era clara e objectiva no que respeita à especialidade da acústica, solicitando como elementos necessários à instrução dos pedidos de autorização e de alteração de autorização da utilização uma *avaliação acústica* (alínea j) do artigo 15º).

A objectividade era, no entender dos autores do presente artigo, inequívoca, dado que o termo *avaliação acústica* se encontra definido na lei base relativa à prevenção e controlo da poluição sonora, isto é, no Regulamento Geral do Ruído (RGR), publicado em anexo ao Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro, designadamente na alínea c) do artigo 3º, complementada com o disposto nos artigos 34º e 12º, este último relativo ao controlo das operações urbanísticas.

Em particular, no que respeita aos elementos relativos aos pedidos de autorização e de alteração de autorização da utilização de edifícios, o RGR remete para lei especial o controlo deste elemento das operações urbanísticas, através do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), publicado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio e alterado e republicado pelo Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho.

Por sua vez, no artigo 3º do RRAE, estão definidas as responsabilidades atribuídas a cada um dos intervenientes na área da acústica, acrescentando, ainda, requisitos mais específicos no que respeita à verificação da conformidade da execução em obra com o estabelecido no respectivo projecto acústico, através da aplicação dos critérios de amostragem elaborados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Toda esta regulamentação define, de modo evidente, todos os elementos necessários à verificação da conformidade de uma obra com o correspondente projecto acústico, assim como as responsabilidades de cada um dos intervenientes.

A intervenção do legislador tornou esta situação confusa, pois numa aparente tentativa de simplificação alterou o previamente estabelecido, obscurecendo o que era claro.

De forma análoga ao efectuado em artigo anterior, "*A avaliação acústica em Portugal – A perspectiva de um laboratório acreditado em acústica*", os mesmos autores propõem-se agora a apresentar sugestões que permitam clarificar a aplicação da actual legislação sobre acústica de edifícios, assim como definir as responsabilidades dos diferentes intervenientes, de modo a minimizar a crescente apreensão que mais uma vez se instalou no seio dos laboratórios acreditados em acústica.

## 2. ESTADO DA ARTE

Anteriormente à publicação da P113/2015, a obtenção de autorização da utilização de edifícios exigia, textualmente, uma avaliação acústica. A P113/2015 substitui, pelo menos aparentemente, a avaliação acústica por um "Termo de Responsabilidade" (TR) subscrito por pessoa legalmente habilitada a ser autor de projecto relativo à conformidade da obra com o respectivo projecto acústico.

Ora, para os intervenientes menos informados esta é uma mudança profunda, tendo originado bastante apreensão, designadamente nos responsáveis dos laboratórios acreditados em acústica.

Na realidade, em termos formais, nada se alterou, dado que a "pessoa legalmente habilitada" para conferir a referida conformidade, tem de, obrigatoriamente, aplicar o estabelecido no RRAE que indica claramente, no artigo 3º, que a conformidade "deve" (leia-se "tem que") ser efectuada com base em ensaios acústicos, tendo em conta o disposto no RGR, designadamente nos artigos 33º e 34º.

Este foi o entendimento dos autores que, imediatamente a seguir à publicação da P113/2015, transmitiram este juízo, tendo este sido adoptado pelo movimento espontâneo de associação de laboratórios de acústica.

Este movimento enviou um conjunto de questões e de pedidos de esclarecimento às entidades responsáveis, nomeadamente ao LNEC e à Sociedade Portuguesa de Acústica (SPA), que, em resposta, corroboraram, por escrito, este entendimento. Em particular, o parecer emitido pelo LNEC refere o que se encontra previsto na legislação e que deveria ter carácter vinculativo, tal como indicado no artigo 4º do RRAE e relembrado pelo próprio LNEC.

Se, formalmente, de facto, nada se alterou, a realidade é bem diferente. Em termos práticos, a responsabilidade de pedir a avaliação acústica passou a ser do autor do TR (porque efectivamente este só deverá emitir tal termo depois de analisar a correspondente avaliação acústica), mas as entidades licenciadoras, nomeadamente as Câmaras Municipais (CM) possuem a opção de pedirem elas próprias a avaliação acústica, tal como previsto no artigo 2º da P113/2015 e reafirmado pelo LNEC e pela SPA nos pareceres que emitiram.

Em contacto mantido entre os autores do presente artigo e os técnicos de algumas CM, o entendimento destes é, para já, de que apenas é necessário solicitar o TR. Quando confrontados com o facto de a própria P113/2015 conferir a possibilidade de solicitar documentos adicionais (neste caso, a avaliação acústica) as respostas foram: (i) se não têm obrigatoriamente de pedir, não o fazem ou (ii) se pedissem, poderiam estar a colocar em causa a capacidade técnica dos autores dos TR.

Mesmo quando confrontados com a questão de que, em sede de vistoria, é possível ser solicitada a apresentação dos documentos referentes à avaliação acústica para atestar da conformidade do TR, o entendimento das CM é, actualmente o seguinte: de acordo com o Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação (RJUE) (com base nos artigos 10º e 13º) deve ser diminuído o controlo prévio aumentando-se a fiscalização *a posteriori*, ou seja, se existem TR, concede-se a licença e, eventualmente, posteriormente, será verificada a assumida conformidade, sujeitando-se os intervenientes às inevitáveis nefastas consequências.

Esta é também a opinião do Provedor de Justiça (PdJ), que confirma, em documento por si emitido, esta linha de pensamento. É, precisamente, este documento do PdJ que está na génese do presente artigo.

Nesse sentido e na sequência de um inquérito elaborado pelo PdJ sobre a problemática do ruído junto dos municípios, os autores do presente artigo questionaram o PdJ sobre as responsabilidades acometidas às CM e aos autores dos pareceres técnicos.

Numa primeira fase, o PdJ informou que, no âmbito das suas competências, não emite pareceres ou pedidos de consulta, apenas aprecia queixas, pedindo para reformular o teor da questão apresentada, ao que os autores responderam que, efectivamente, não se tratava de uma queixa mas sim de um pedido de esclarecimento sobre o próprio inquérito, por entenderem que seria uma mais-valia na clarificação desta problemática.

Posteriormente, os autores foram contactados directamente pelo PdJ sobre a questão inicialmente colocada, sendo que perante a justificação acima referida e com base no próprio interesse despertado junto do PdJ, este se pronunciou no sentido de esclarecer que o actual

estado da arte aponta, de facto, para o reforço da responsabilidade dos autores dos TR em detrimento da responsabilidade das entidades licenciadoras.

Perante o exposto, mantém-se uma questão: como é supervisionado o papel da "pessoa legalmente habilitada a ser autor de projecto relativo à conformidade da obra com o projecto acústico"?

## 3. ANÁLISE DA ACTUAL SITUAÇÃO

Na opinião dos autores do presente artigo e num termo tão comum aos laboratórios acreditados, a melhoria da qualidade do serviço prestado ao cliente, impõe que este, ao contratar um serviço desta natureza (avaliação acústica), possa focar a sua decisão sobre questões da qualidade do serviço realizado pelas empresas consultadas, estando assegurado que, em termos técnicos, as várias propostas apresentadas respondem efectivamente às suas necessidades.

Assim, relativamente à P113/2015, existem formas de clarificar a questão:

- Uma simples adenda/correcção à P113/2015 (existem instrumentos legais que permitem rectificar uma portaria, tal como sucedeu com a anterior portaria), onde se indicaria textualmente que, por exemplo, o TR tem de ser, obrigatoriamente, acompanhado pelo correspondente relatório de ensaios acústicos, sendo que, deste modo, o "Parecer" mencionado nos critérios de amostragem do LNEC, seria substituído pelo próprio TR, tal como é sugerido pela SPA.

  Esta alteração tem todo o sentido, dado estar imbuída do próprio espírito da P113/2015, pois caso contrário, será difícil perceber a discrepância existente entre os elementos necessários para verificar a conformidade energética dos edifícios e os correspondentes à verificação da conformidade acústica dos mesmos, que se baseia, apenas, na apresentação do TR

- A tomada de responsabilidade por parte das entidades licenciadoras, designadamente as CM, solicitando a apresentação do relatório de ensaios acústicos em conjunto com o correspondente TR. Esta é uma faculdade que assiste às entidades licenciadoras e que se encontra prevista no artigo 2º da P113/2015.

  Em alternativa e como mencionado anteriormente, tornar obrigatório, durante a vistoria, a apresentação do relatório de ensaios acústicos em que se baseou o correspondente TR

- Implementar um modelo (minuta) do TR, relativo à conformidade da obra com o projecto acústico (que se poderá aplicar a outras especialidades) e que a P113/2015 não contempla.

  Existem modelos propostos pela SPA assim como pelo movimento espontâneo associação de laboratórios de acústica, onde é claramente referido o relatório que serviu de base ao TR, através, não só, da referência do próprio relatório, como também da indicação do laboratório que o realizou

Os autores do presente artigo consideram, então, que:

- Os autores dos TR não são, em cada situação concreta, supervisionados por nenhuma entidade competente, pelo que, no caso de não se encontrarem devidamente actualizados ou de não possuírem os conhecimentos técnico-experimentais adequados à avaliação do trabalho realizado pelo laboratório que efectuou os ensaios acústicos,

poder-se-á assistir a uma errónea aceitação, ou não aceitação, de determinada conformidade legal, apenas porque à entidade licenciadora só lhe interessa o que consta no TR que lhe é apresentado.

De facto, só em situações de conflito judicial, em que os autores do presente artigo já por diversas ocasiões participaram, é que as consequências desta falta de supervisão técnica são sentidas, sendo que, na maioria dos casos, são os utilizadores finais dos edifícios que suportam os custos inerentes às deficiências acústicas identificadas, bem como aos anos que os tribunais demoram a decidir como e quem tem a obrigação legal de as resolver

- Face à orientação da legislação actual, em que a responsabilidade da verificação da conformidade das especialidades é atribuída a "pessoas legalmente habilitadas", parece, então, evidente, que terão de ser as respectivas ordens profissionais (OP) a supervisionar, avaliar e atestar o teor dos diferentes TR que são emitidos pelos seus associados.

  Evidentemente que se considera ser muito difícil que as OP disponham de capacidade para verificar todos os TR emitidos. No entanto, é possível controlar o teor dos TR, por exemplo, através de acções de fiscalização juntos das entidades licenciadoras em que, por amostragem, se seleccionariam alguns processos que seriam objecto de análise detalhada

## 4. CONCLUSÕES

No seguimento do descrito, deve, então, ter-se em linha de conta o seguinte:

- Nos pedidos de autorização e de alteração de autorização da utilização, é imperiosamente desejável que os mesmos considerem o TR em conjunto com o relatório da correspondente avaliação acústica

- É imperativo que, de algum modo, sejam supervisionados os teores dos TR, bem como a competência técnico/científica dos respectivos autores

Mais uma vez, os autores do presente artigo não consideram ser estas as únicas soluções a serem, desejavelmente e num curto espaço de tempo, implementadas, mas antes entendem ser este um possível ponto de partida para a necessária resolução das questões aqui levantadas.

Concorde-se ou não, o espírito da legislação actualmente em vigor no âmbito da acústica de edifícios, é o da diminuição do controlo prévio em contraposição com o aumento da fiscalização *a posteriori*. Como é evidente, esta linha de pensamento e de execução pode tornar-se muito perigosa devido aos riscos que acarreta, designadamente para os utilizadores finais dos espaços construídos, uma vez que não se aplica apenas à especialidade da acústica mas a todas as restantes especialidades.

De facto, considere-se, por exemplo, o caso da especialidade relativa à conformidade estrutural de um edifício. Se for cometida uma qualquer incorrecção que venha a determinar a derrocada do edifício ou de parte do mesmo, a lei em vigor determina que o responsável por tal é o técnico que atestou a conformidade do edifício em termos estruturais.

Suponha-se, agora, que aquela derrocada provoca danos humanos. Em que medida a fiscalização a *posteriori* mitiga esses danos? Por outro lado, embora a lei as ilibe, será que as entidades licenciadoras, como entidades com a responsabilidade de procederem à emissão da

respectiva autorização de utilização, não serão, também, claramente coniventes nos danos subsequentes?

Regressando à especialidade da acústica, relembre-se que a P113/2015, no artigo 2º, confere às entidades licenciadoras a possibilidade de requererem os elementos previstos em leis especiais (no casos concreto da acústica, a lei especial está consubstanciada no RRAE) ou em planos de ordenamento do território.

No que respeita aos autores dos TR e, por inerência às respectivas OP, foi-lhes permitido emitirem documentação que atesta a conformidade acústica dos edifícios. Parece, então, claro, que estes técnicos terão de ser regularmente avaliados pela respectiva OP, no sentido de assegurar que, em termos técnicos e científicos, se encontram devidamente actualizados e que o teor dos TR emitidos seguem o actual estado da arte em termos da especialidade da acústica de edifícios.

Na opinião dos autores do presente artigo, se é possível prevenir, não faz qualquer sentido ter mais tarde de remediar, tanto mais que, na maioria dos casos, remediar significa mais custos e mais aborrecimentos. Foi com este espírito que o legislador elaborou a lei de base de controlo de ruído e, por razões difíceis de entender, procura actualmente inverter o caminho da melhoria da qualidade acústica dos espaços construídos e consequentemente da melhor qualidade de vida dos respectivos utilizadores.

## 5. REFERÊNCIAS

[1] Portaria nº 113/2015, de 22 de Abril – Elementos instrutórios dos procedimentos previstos no Regime Jurídico da Urbanização e Edificação

[2] Portaria nº 232/2008, de 11 de Março – Elementos instrutores dos pedidos de realização de operações urbanísticas (revogada pela Portaria nº 113/2015, de 22 de Abril)

[3] Decreto-Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro – Regulamento Geral do Ruído

[4] Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

[5] LNEC; *Regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios – Avaliação acústica / Critérios de amostragem;* Lisboa; 2012

[6] R.J.F. Pereira; Carlos César Rodrigues; "*A avaliação acústica em Portugal – A perspectiva de um laboratório acreditado em acústica*"; Tecniacústica – Múrcia; 2014

[7] LNEC; *Parecer sobre o âmbito da aplicação do disposto no nº 25, alínea g), do Capítulo V, da Anexo I, da Portaria nº 113/2015, de 22 de Abril*; Lisboa; 2015

[8] SPA; *A publicação da Portaria nº 113/2015: Implicações na área da Acústica*

[9] Decreto-Lei nº 555/99, de 16 de Dezembro, alterado e republicado pelo Decreto-Lei nº 136/2014, de 9 de Setembro – Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação

[10] Provedor de Justiça; *Ofício com a ref.ª Proc. Q-7583/14, de 30 de Junho de 2015 – Assunto: requisitos acústicos dos edifícios – responsabilidade*

[11] Provedor de Justiça; *Inquérito aos municípios sobre prevenção e controlo do ruído*; Lisboa; 2012

[12] Declaração de Rectificação nº 26/2008, de 9 de Maio – Rectificação da Portaria nº 232/2008, de 11 de Março – Elementos instrutores dos pedidos de realização de operações urbanísticas

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SIMULACIÓN POR EL FEM DE LA TRANSMISIÓN DEL RUIDO DE IMPACTOS EN SUELOS PESADOS

PACS: 43.40.Kd

Magdaleno, Jesús; Martín Bravo, Mª Ángeles; García Terán, José Mª; Tarrero, Ana Isabel
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
C/ Francisco Mendizábal nº 1
47014 Valladolid
Tel. 34 983 423 525
magdal@uva.es

## ABSTRACT

Impact sound reduction improvement using floor coverings is determined according to tests defined in different standards. This paper presents a simulation of the test method described in the standard UNE EN-ISO 16251-1, using the finite element method (FEM). Different boundary conditions, excitation sources and mesh are analyzed. FEM models have achieved satisfactory results of impact sound pressure level reduction.

## RESUMEN

La mejora del aislamiento acústico al ruido de impacto mediante el revestimiento del suelo se determina de acuerdo con ensayos definidos en diferentes normas. Esta comunicación recoge la simulación del método de ensayo normalizado descrito en la norma UNE EN-ISO 16251-1 utilizando el método de los elementos finitos (FEM) y se analizan diferentes modelos de las condiciones de contorno, fuentes de excitación y mallas. Los modelos FEM han conseguido resultados adecuados de los valores de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una solución para mejorar el aislamiento acústico, sobre todo al ruido de impactos, es el uso de suelos flotantes. El conjunto consiste, básicamente, en un forjado u otro soporte resistente, un material aislante a ruido de impactos (capa elástica) y un acabado suficientemente rígido. La estructura de capas puede ser más compleja, por ejemplo introduciendo, entre el acabado y el material aislante, una capa de mortero o placas de yeso laminado [1]. El material aislante y el acabado provocan una discontinuidad perpendicular a la dirección de recorrido de las ondas de vibración que produce una menor transmisión. Es importante que no existan conexiones rígidas con las paredes perimetrales. El suelo flotante se considera un revestimiento y, desde el punto de vista acústico, se caracteriza por:

- La mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, $\Delta R_A$, en dBA;
- La reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos (reducción del nivel global de presión de ruido de impactos), $\Delta L_w$, en dB.

La reducción del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L$) se define como la reducción resultante de la instalación del recubrimiento de suelo de ensayo sobre un suelo de referencia específico. Su estimación se trata en la norma EN ISO 12354-2:2001 [2], anexo C, aunque su uso está indicado si no están disponibles los valores medidos. Se contemplan dos casos, expresados en las Ec. 1 y Ec. 2.

- Suelos hechos a base de arena/cemento o sulfatos de calcio:

$$\Delta L = 30\, log \frac{f}{f_o} \quad dB \qquad \text{Ec. 1}$$

- Suelos flotantes asfálticos o suelos flotantes secos:

$$\Delta L = 40\, log \frac{f}{f_o} \quad dB \qquad \text{Ec. 2}$$

La frecuencia de resonancia del sistema, $f_o$, puede calcularse con la Ec. 3, donde $s'$ es la rigidez dinámica por unidad de área de la capa elástica, en meganewtons por metro cúbico, y $m'$ es la densidad superficial del suelo flotante, en kilogramos por metro cuadrado.

$$f_o = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \qquad \text{Ec. 3}$$

La medida en laboratorio de $\Delta L$ viene especificada en EN ISO 10140-1:2011 [3], anexo H, y deben seguirse las directrices para las medidas indicadas en EN ISO 10140-3:2011 [4] y los requisitos de instalaciones y equipos indicados en EN ISO 10140-5:2011 [5]. Para tener valores comparables entre laboratorios, se utilizan los valores de un suelo de referencia, que idealizan los valores medidos. Se determinan por la diferencia entre los valores medidos en un suelo de referencia sin recubrimiento y el mismo suelo con recubrimiento (Ec. 4). $L_{n,r,0}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado del suelo de referencia sin el recubrimiento y $L_{n,r}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado del suelo de referencia con el recubrimiento.

$$\Delta L = L_{n,r,0} - L_{n,r} \qquad \text{Ec. 4}$$

Los suelos de referencia normalizados se especifican en [5]: un suelo de referencia pesado y tres tipos de suelos de referencia ligeros. Para cada uno de ellos se dan valores de los niveles de presión de ruido de impactos normalizados para el suelo de referencia sin recubrimiento ($L_{n,r,0}$), el nivel normalizado ponderado de la presión de ruido de impactos para el suelo de referencia sin recubrimiento ($L_{n,r,0,w}$) y el término de adaptación espectral para el suelo de referencia sin recubrimiento ($C_{I,r,0}$). La reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L_w$), se determina mediante el procedimiento descrito en EN ISO 717-2:2013 [6].

$$\Delta L_{\mathrm{w}} = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \qquad \text{Ec. 5}$$

Para reducir los costes de los ensayos se están investigando diferentes alternativas, con ensayos sobre modelos simplificados no normalizados, que permitan comparar las potenciales reducciones de ruido de impactos de las diferentes soluciones constructivas y materiales [7]. La norma EN ISO 16251-1:2015 [8] utiliza una losa de hormigón de 1,2 m × 0,8 m × 0,2m, apoyada en cuatro soportes elásticos. Los resultados han sido evaluados por varios grupos de investigación [9]-[13], y son aproximados a los obtenidos con el modelo de EN ISO 10140 para recubrimientos que reaccionan localmente, como determinados recubrimientos blandos, por ejemplo PVC y linóleo.

En esta comunicación se analiza la reducción del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L$) mediante modelos de elementos finitos (FEM), tomando como referencia el modelo de ensayo descrito en la norma EN ISO 16251-1:2015 [8]. Para ello se utilizan diferentes modelos, en los que se modifican las condiciones de contorno, las fuentes de excitación y las mallas.

## 2. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

La instalación a modelizar consiste en una losa de hormigón, colocada sobre soportes blandos en sus cuatro esquinas. El tamaño de la losa es de 120 cm x 80 cm x 20 cm. La superficie de los apoyos es de 8 cm x 8 cm. Sobre esta losa se coloca una capa elástica y una placa flotante de hormigón, para simular un suelo flotante.

Se utilizarán dos capas elásticas, que se identificarán como muestras M2 y M6, con una rigidez dinámica de 5,34 y 13,93 MN/m$^3$, respectivamente. Con la muestra M2 se estudiará la influencia de algunos de los parámetros utilizados en los modelos. Las conclusiones obtenidas se aplicarán en el caso cuando se usa de la muestra M6 como capa elástica. El material que se utiliza en la losa y en la placa flotante es hormigón, con un módulo de Young (E) de 32 GPa, un coeficiente de Poisson ($\nu$) de 0,2, una densidad ($\rho$) de 2400 Kg/m$^3$ y un factor de pérdida interno ($\eta_{int}$) de 0,01. La placa flotante tiene un espesor de 20 mm.

Para los apoyos de la losa se han utilizado dos modelos. Un modelo utiliza elementos 3D con un material elástico de densidad 10 kg/m$^3$, coeficiente de Poisson 0,3 y módulo de Young variable, según la frecuencia propia que se determine. Estos módulos de Young han estado en torno a los 8 MPa. El segundo modelo para los apoyos, utiliza elementos tipo muelle, también con rigidez variable según la frecuencia propia que se determine.

De acuerdo con estudios anteriores [14], en la losa y en la placa flotante se utilizan mallas con elementos 2D, tipo "*Thin shell parabolic quadrilateral*", con la formulación de lámina gruesa de Mindlin. Se utiliza un tamaño nominal de elemento de 50 mm, resultando 504 elementos y 1597 nodos. La malla se muestra en la Figura 1.

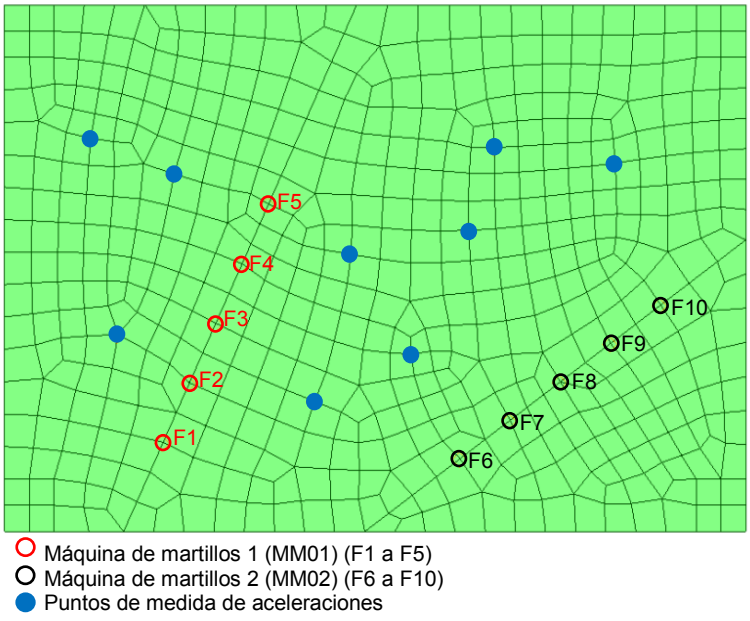



Figura 1: Malla de la losa, con indicación de los puntos de impacto y de los puntos de medida de aceleraciones.

Para las condiciones de contorno de movimientos, se consideran tres casos, dos tipos de apoyo y la condición de sólido libre. Un tipo de apoyo consiste en elementos 3D, tipo "*solid parabolic brick*", con 8 elementos por apoyo (Figura 2a). Cada uno de los apoyos tiene unas dimensiones de 8 cm x 8 cm x 1 cm. El segundo tipo de apoyo introduce elementos muelle en la superficie (Figura 2b). En ambos casos, los nodos inferiores tienen impedidos todos los movimientos.

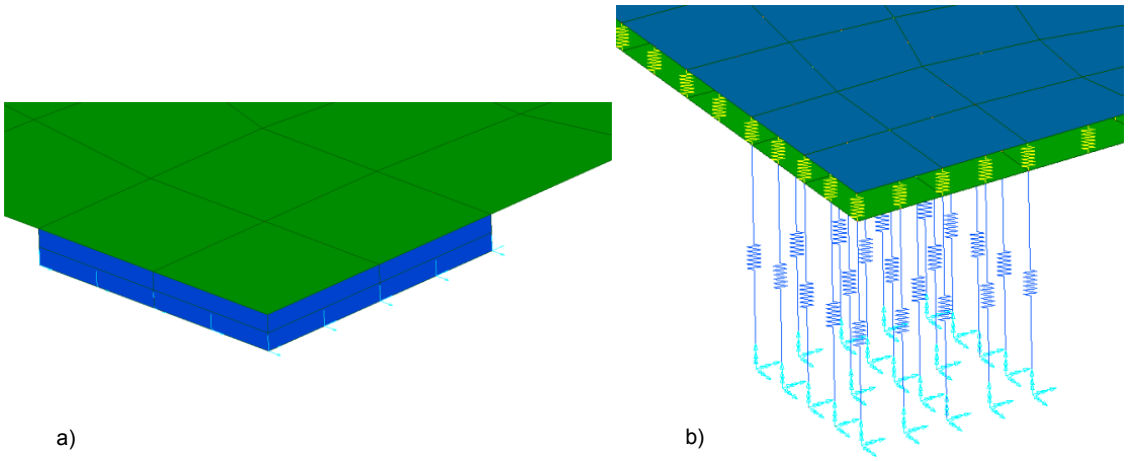



Figura 2: Tipos de apoyos: a) Elementos 3D y losa desnuda. b) Elementos muelle y modelo con capa elástica M2.

En cuanto a las excitaciones, se consideran tres tipos. La primera es una excitación tipo máquina de martillos (MM) [14]. La segunda es una excitación estacionaria puntual (MMFi, donde Fi es el punto de aplicación), en la que se concentra en un punto los impactos de la máquina de martillos, resultando la misma frecuencia de 10 Hz. Por último, se ha utilizado una carga de impacto.

## 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Figura 3 muestra los resultados de $\Delta L$ para apoyos con una frecuencia de resonancia de 40 Hz, cuando se utiliza una excitación tipo máquina de martillos (MM). Además de los valores promedio de dos posiciones de la máquina de martillos, se representan las barras de error, que indican los valores máximo y mínimo para cada banda de un tercio de octava. También se representan las estimaciones dadas por las Ec. 1 y Ec. 2. Otros autores han publicado resultados utilizando frecuencias de resonancia de los apoyos entre 27 y 38 Hz [10]-[12].

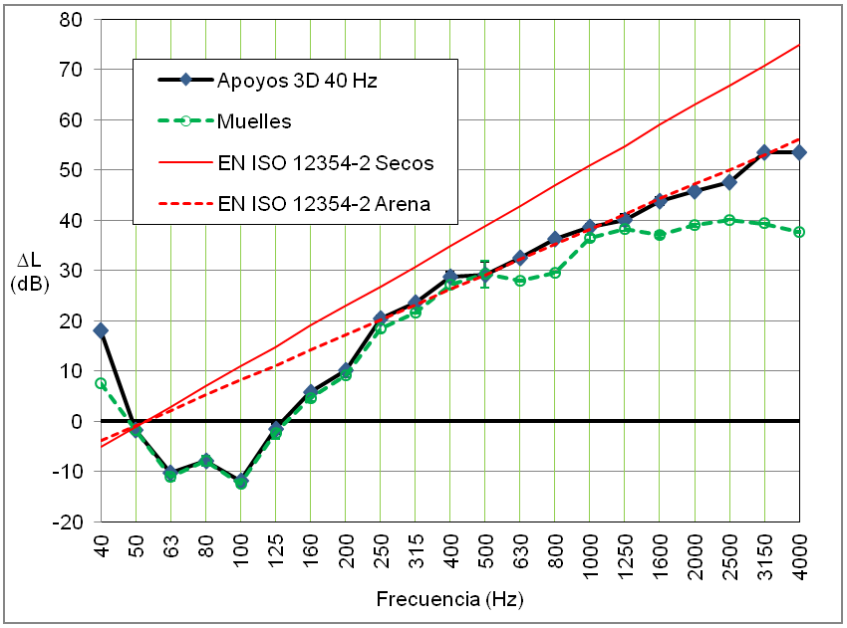



Figura 3: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos Para apoyos con elementos 3D y muelles, con una frecuencia de resonancia de 40 Hz. Excitación tipo máquina de martillos (MM). Capa elástica M2.

Teniendo en cuenta los intervalos de las barras de error, puede decirse que la influencia de la posición de la máquina de martillos es pequeña en general, aunque en algunos casos sí es significativa. Por lo tanto, parece recomendable utilizar, al menos, dos posiciones de dicha máquina de martillos.

Cuando se utilizan condiciones de sólido libre, los resultados de $\Delta L$ se muestran en la Figura 4, comparados con el apoyo modelizado con elementos 3D de 40 Hz, con excitación tipo MM. Los resultados con la condición de sólido libre se representan para la excitación tipo MM y para la excitación tipo impacto en el punto F3.

Se observa un desplazamiento importante en los resultados del modelo sólido libre con excitación tipo máquina de martillos, debido a que la rutina de cálculo incluye, automáticamente, muelles para corregir la singularidad del sistema. Cuando la excitación es tipo impacto, dichos elementos no influyen apreciablemente en los resultados, por lo que los resultados son semejantes a los obtenidos con otras vinculaciones y excitaciones, aunque aparecen efectos no deseados en alguna banda de frecuencia. Una translación de los resultados obtenidos en el modelo sólido libre con la excitación tipo MM, proporciona resultados casi equivalentes a los obtenidos con el modelo de apoyos 3D (sólido libre corregido en la Figura 4).

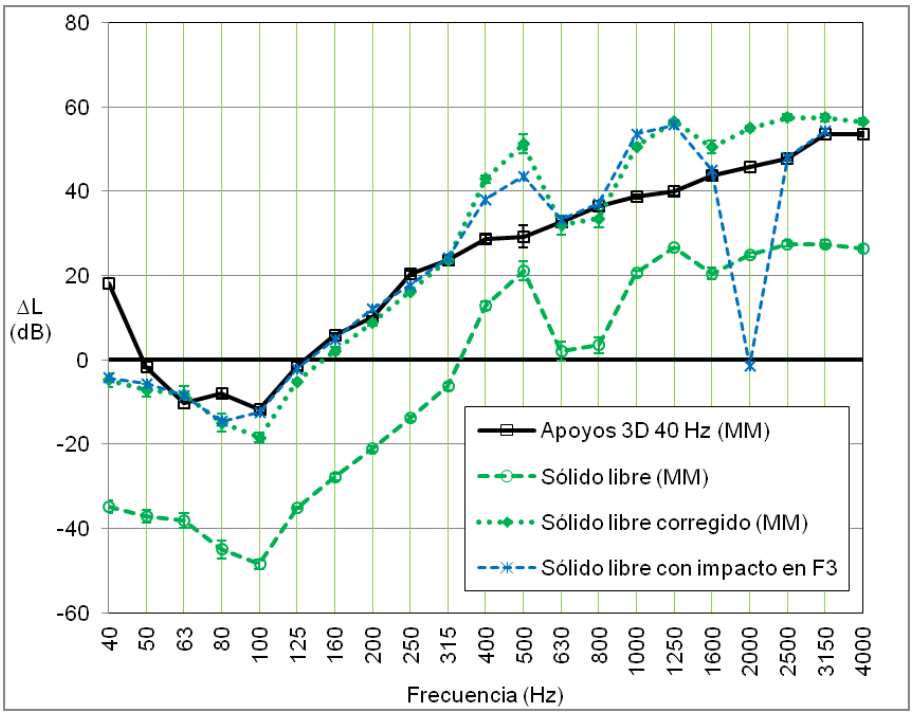



Figura 4: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D (40 Hz) y cuando la condición es de sólido libre. Excitación tipo máquina de martillos (MM) y excitación tipo impacto en el punto F3.

Para valorar la influencia de concentrar en un punto los impactos de la máquina de martillos, se ha estudiado la excitación tipo estacionaria puntual en F3 (MMF3). Los resultados se representan en la Figura 5, donde puede apreciarse que la respuesta a este tipo de excitación es similar a la respuesta a la excitación tipo máquina de martillos (MM), aunque esta última es más regular y evita la utilización de mayor número de puntos de excitación para alcanzar resultados más precisos.

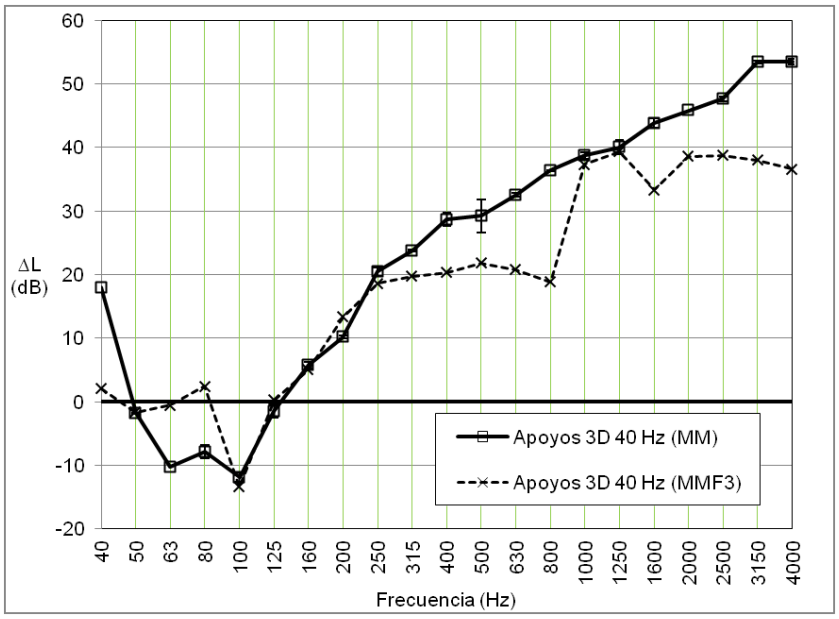



Figura 5: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D (40 Hz) para una excitación tipo máquina de martillos (MM) y una excitación tipo estacionaria puntual en F3 (MMF3).

A continuación se aplicarán estas condiciones cuando la capa elástica es la muestra M6. Los resultados de $\Delta L$ se muestran en la Figura 6, junto con la estimación de la norma EN ISO 12354-2:2001 para suelos secos y los resultados del modelo con la condición de sólido libre, que puede ayudar en la validación del modelo. Los mejores resultados se obtienen, en este caso, cuando la frecuencia de resonancia de los apoyos es 36 Hz.

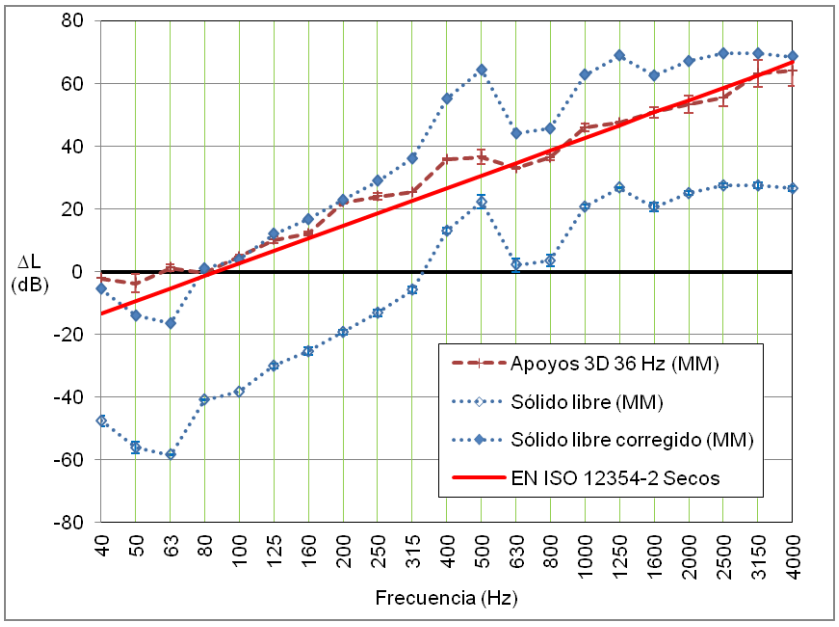



Figura 6: Reducción del nivel de presión de ruido de impactos cuando los apoyos son elementos 3D, con diferente frecuencia de resonancia. Excitación tipo máquina de martillos. Capa elástica M6.

En la Tabla 1 se muestran los valores del nivel de aceleración ponderado ($L_{a,w}$) y su correspondiente término de adaptación espectral para los modelos de losa desnuda, según la

norma EN ISO 717-2:2013 [6]. En la misma tabla se muestran los parámetros anteriores, junto con la reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L_w$), para los modelos de capa flexible con la muestra M2 y muestra M6.

Tabla 1: Nivel de aceleración ponderado, término de adaptación espectral y reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos, para los modelos con losa desnuda, muestra M2 y muestra M6.

| | Losa desnuda | | Muestra M2 | | Muestra M6 |
|---|---|---|---|---|---|
| | Muelles 40 Hz | Apoyos 3D 40 Hz | Muelles 40 Hz M2 | Apoyos 3D 40 Hz M2 | Apoyos 3D 36 Hz M6 |
| $L_{a,w}$ (dB) | 38 | 39 | 33 | 33 | 19 |
| $C_I$ (dB) | -3 | -3 | 10 | 10 | 6 |
| $\Delta L_w$ (dB) | | | 19 | 20 | 32 |

## 4. CONCLUSIONES

Los modelos FEM han conseguido resultados adecuados, para dos capas elásticas (muestras M2 y M6), de los valores de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L$), del nivel de aceleración ponderado ($L_{a,w}$) y de la reducción ponderada del nivel de presión de ruido de impactos ($\Delta L_w$). El mejor modelo para el cálculo de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos es el caso de apoyos 3D, con excitación tipo máquina de martillos. Para los modelos de capa flexible con la muestra M2, resultaría un valor de $\Delta L_w$=20 dB, aunque podría esperarse un valor algo superior, dado el resultado para otros casos. Para los modelos de capa flexible con la muestra M6, resultaría un valor de $\Delta L_w$ entre 32 y 38 dB, dados los resultados para otros casos.

Con el FEM se ha podido estudiar la influencia de algunos de los parámetros utilizados en los modelos. Se ha comprobado que influencia de la posición de la máquina de martillos es pequeña en general, aunque en algunos casos puede llegar a ser significativa. Por lo tanto, parece recomendable utilizar, al menos, dos posiciones de dicha máquina de martillos.

En cuanto a la influencia del tipo de apoyos de la losa de hormigón, parece más adecuado utilizar apoyos modelizados con elementos 3D, sobre todo cuando se requieren resultados a frecuencias altas. Para frecuencias bajas y medias, los resultados con apoyos modelizados con elementos tipo muelle son casi coincidentes con los anteriores, por lo que puede ser una simplificación adecuada en algunos casos.

Cuando se utilizan condiciones de sólido libre, se observa un desplazamiento importante en los resultados del modelo cuando la excitación es del tipo máquina de martillos. Cuando la excitación es tipo impacto, los resultados son semejantes a los obtenidos con otras vinculaciones y excitaciones. Una translación de los resultados obtenidos en el modelo sólido libre con la excitación tipo MM, proporciona resultados casi equivalentes a los obtenidos con el modelo de apoyos 3D, y puede servir de referencia para validar los resultados.

Se consigue una buena aproximación, en algunas bandas de frecuencia, entre los valores proporcionados por la excitación tipo máquina de martillos y la excitación tipo estacionaria puntual en F3. La respuesta de la máquina de martillos es más regular y evita la utilización de más puntos de excitación para alcanzar resultados más precisos, aunque es más costosa de modelizar.

La metodología utilizada permite realizar estudios sobre los parámetros involucrados sin utilizar de forma intensiva modelos físicos, que suelen ser más costosos y lentos. Además, se pueden detectar algunos problemas, antes de construir las instalaciones de ensayo, y realizar comprobaciones cruzadas entre los resultados experimentales y numéricos, para evitar errores.

## REFERENCIAS

[1] Ministerio de Fomento. (2011). *Catálogo informático de elementos constructivos, v2.1.* Retrieved 06/24, 2015, from http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos.

[2] EN 12354-2:2001. Acústica De La Edificación. Estimación De Las Características Acústicas De Las Edificaciones a Partir De Las Características De Sus Elementos. Parte 2: Aislamiento Acústico a Ruido De Impactos Entre Recintos, (2001).

[3] EN ISO 10140-1: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos, (2011).

[4] EN ISO 10140-3: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al y ruido de impactos, (2011)..

[5] EN ISO 10140-5: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del Aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 5: Requisitos para instalaciones y equipos de ensayo, (2011).

[6] EN ISO 717-2: 2013. Acústica. Evaluación Del Aislamiento Acústico En Edificios y Elementos De Construcción. Parte 2: Aislamiento a Ruido De Impactos, (2013).

[7] Branco, F. G., & Godinho, L. (2013). On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. *Construction and Building Materials, 45*(0), 184-191.

[8] EN ISO 16251-1:2015. Acústica. Medición En Laboratorio De La Reducción De La Transmisión Del Ruido De Impacto Por Revestimientos De Suelo Sobre Un Suelo De Pequeñas Dimensiones. Parte 1: Suelos Pesados. (ISO 16251-1:2014), (2015).

[9] Bjor, O. (2010). Simplified measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings. *Proceeding of the Baltic Nordic Acoustic Meeting.*

[10] Foret, R., Chéné, J., & Guigou-Carter, C. (2011). A comparison of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings measured using ISO 140-8 and ISO/CD 16251-1. *Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark,* , 1371–6.

[11] Pereira, A., Godinho, L., Mateus, D., Ramis, J., & Branco, F. G. (2014). Assessment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings. *Applied Acoustics, 79*(0), 92-103.

[12] Schmidt, J. -., Wittstock, V., & Langer, S. C. (2014). Uncertainties and validation procedures for the compact measurement setup. *INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World through Noise Control,*

[13] Mateus, D., Pereira, A., Gonçalves, H., Godinho, L., & Branco, F. (2013). Avaliação experimental da redução sonora de sistema de piso flutuante com lajetas em microbetão e em pedra. *Tecniacústica 2013,* Valladolid.

[14] Martín-Bravo, M., Magdaleno, J., García-Terán, J., & Tarrero, F. (2014). Aplicaciones del método de los elementos finitos en la transmisión estructural del sonido en edificios. Tecniacústica 2014, Murcia. pp. 931.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONTROL DE VIBRACIONES DE EQUIPAMIENTO MECÁNICO EN RECINTOS CRÍTICOS

PACS: 43.55.Vj

Bastián Monarca; Nicolás [1]
[1] Departamento Comercial, Área Comercial
Silentium, Ingeniería del Silencio
José Ananías 207 A, Santiago, Chile
Tel. +56 2 24489820
E-mail: nbastian@silentium.cl

## ABSTRACT

Vibration isolation of mechanical equipment is a common problem in any building project. Mechanical equipment that generates unwanted vibration and is mounted on technical or mechanical floors, or placed in genset rooms should be isolated. In this work the criteria, designs and application to achieve successful vibration isolation are presented.

## RESUMEN

El control de vibraciones de equipamiento mecánico es un problema usual en cualquier proyecto de construcción. Pisos técnicos, pisos mecánicos, salas de generadores, entre otros, son pisos y/o salas en las cuales hay muchos equipos que generan vibraciones nocivas que deben ser controladas. En este trabajo se presentan criterios, diseños y aplicaciones para realizar un correcto aislamiento de vibraciones.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ruido estructural generado por equipamiento mecánico es un problema usual en edificios hospitalarios, oficinas, hoteles, entre otros. Esto ocurre porque este tipo de construcciones cuenta con una gran variedad de equipos que funcionan con motores, los cuales generar vibraciones molestas. Bombas de agua, bombas de calor, enfriadores de agua (chillers), fancoils, grupo electrógenos, torres de enfriamiento, unidades manejadoras de aire y ventiladores son equipos que deben considerar un tratamiento especial para aislar las vibraciones que generan.

La forma más efectiva de eliminar las vibraciones es utilizando un aislador de vibración entre el equipo y la estructura que lo soporta. El criterio mundialmente utilizado para elegir el tipo de aislador es el entregado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) [1], el cual, dependiendo del tipo de equipo y otros parámetros, recomienda una deflexión estática mínima que debe tener el aislador.

Por otra parte, los equipos que trabajan con fluidos (como las bombas de agua) deben utilizar juntas flexibles en la conexión con las cañerías, ya que también se generan vibraciones debido al flujo turbulento que producen los equipos.

Debido a lo anterior, es necesario considerar en el diseño acústico de proyectos el efecto de la transmisión de vibraciones y recomendar medidas de mitigación, con el fin de evitar el ruido estructural.

## 2. CONTROL DE VIBRACIONES EN LA PRÁCTICA

### 2.1. Generalidades

El diseño de un sistema completo de control de vibraciones se puede dividir en cinco etapas [2]:
1) La selección de la transmisibilidad o la deflexión estática requerida de un aislador de vibración.
2) La selección del tipo de montaje del sistema.
3) La selección de la ubicación de los aisladores de vibración y la determinación de la carga que debe soportar cada aislador.
4) La selección de un aislador que se adapte a los tres puntos anteriores.
5) El tratamiento de las distintas conexiones de los equipos, asegurando que éstas no cancelen el efecto de los aisladores de vibración.

Al determinar la deflexión estática que se requiere, se puede discriminar si utilizar un aislador de neopreno o un aislador de resorte. Un aislador de neopreno puede tener una deflexión máxima de 13 mm, mientras que un aislador de resorte puede tener una deflexión máxima de 125 mm [3].

La selección del tipo de montaje normalmente se reduce a tres casos, el primero es que se conecte el aislador directo al equipo, el segundo es que se utilice una base de acero entre el equipo y el aislador y el tercer caso es que se utilice una base de concreto (o de inercia) entre el aislador y el equipo [2].

La selección de la ubicación de los aisladores generalmente está dada por los fabricantes de los equipos, ya que los mismos equipos cuentan con perforaciones inferiores (normalmente en las esquinas) donde se pueden anclar los aisladores.

El tratamiento de las conexiones es usual que se enfoque en la utilización de juntas flexibles de una o dos convoluciones en los equipos que trabajan con agua, como bombas de agua, enfriadores de agua, unidades manejadoras de aire y torres de enfriamiento.

Los criterios de diseño para seleccionar la deflexión estática necesaria para aislar un equipo o el tipo de base que requiere, están dados por la ASHRAE y se describen a continuación.

### 2.2. Criterios de Diseño

Para diseñar los sistemas de control de vibraciones se utiliza las indicaciones establecidas por ASHRAE de acuerdo a las características de los equipos que se quieren aislar y su ubicación.

En la Tabla 1 se muestra el tipo de aislador recomendado para diferentes equipos HVAC.

Al ver la Tabla 1, se aprecia que dependiendo de la potencia, revoluciones por minuto, tipo de equipo y luz de losa (mayor dimensión entre elementos estructurales que sostienen a la losa), la ASHRAE entrega una recomendación del tipo de aislador, tipo de base y deflexión estática mínima que se requiere para controlar las vibraciones de los equipos.

Tabla 1. Tipo de aislador recomendado para diferentes equipos HVAC. Fuente: [1]

| | | | Ubicación del equipo | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Losa de hormigón a nivel del suelo | | | Losa hasta 6 m de luz | | | Losa de 6 a 9 m de luz | | | Losa de 9 a 12 m de luz | | |
| Tipo de Equipos | Consumo de energía kW (hp) | Rpm | Tipo de Base | Tipo de Aislador | Defl. Min. mm | Tipo de Base | Tipo de Aislador | Defl. Min. mm | Tipo de Base | Tipo de Aislador | Defl. Min. mm | Tipo de Base | Tipo de Aislador | Defl. Min. mm |
| **Maquinas de refrigeración y enfriadores** | | | | | | | | | | | | | | |
| Alternativo (de pistón) | Todos | Todos | A | 2 | 6 | A | 4 | 19 | A | 4 | 38 | A | 4 | 64 |
| Centrífugos, Scroll (espiral) | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 4 | 19 | A | 4 | 38 | A | 4 | 38 |
| Tornillo | Todos | Todos | A | 1 | 25 | A | 4 | 38 | A | 4 | 64 | A | 4 | 64 |
| Absorción | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 4 | 19 | A | 4 | 38 | A | 4 | 38 |
| Enfriado por aire, alternativo y scroll (espiral) | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 4 | 38 | A | 4 | 38 | A | 4 | 64 |
| Enfriado por aire, de tornillo | Todos | Todos | A | 4 | 25 | A | 4 | 38 | B | 4 | 64 | B | 4 | 64 |
| **Compresores de aire y bombas de vacío** | | | | | | | | | | | | | | |
| Con estanque montado horizontal | ≤7.5 (10) | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 38 | A | 3 | 38 |
| | ≥11 (15) | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| Con estanque montado vertical | Todos | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| Montado sobre una base | Todos | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| Grandes de pistón | Todos | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| **Bombas** | | | | | | | | | | | | | | |
| Monobloc | ≤5.6 (7.5) | Todos | B | 2 | 6 | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 |
| | ≥7.5 (10) | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| Grandes en línea | 3.7 -19 (5-25) | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 38 | A | 3 | 38 | A | 3 | 38 |
| | ≥22 (30) | Todos | A | 3 | 38 | A | 3 | 38 | A | 3 | 38 | A | 3 | 64 |
| De succión axial y con carcasa dividida | ≤30 (40) | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 |
| | 37-93 (50-125) | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 |
| | ≥110 (150) | Todos | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 89 |
| Sistema de bombas empaquetadas | Todos | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 38 | C | 3 | 64 |
| **Torres de enfriamiento** | Todos | Hasta 300 | A | 1 | 6 | A | 4 | 64 | A | 4 | 89 | A | 4 | 89 |
| | | 301-500 | A | 1 | 6 | A | 4 | 38 | A | 4 | 64 | A | 4 | 64 |
| | | Sobre 501 | A | 1 | 6 | A | 4 | 19 | A | 4 | 19 | A | 4 | 38 |
| **Calderas** | | | | | | | | | | | | | | |
| De fuego directo (Fire-tube) | Todos | Todos | A | 1 | 6 | B | 4 | 19 | B | 4 | 38 | B | 4 | 64 |
| Acuotubulares (Waer-tube) | Todos | Todos | A | 1 | 3 | A | 1 | 3 | A | 1 | 3 | B | 4 | 6 |
| **Ventiladores axiales, pleno, gabinetes, secciones, centrífugos en línea** | | | | | | | | | | | | | | |
| Hasta 560 mm de diámetro | Todos | Todos | A | 2 | 6 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | C | 3 | 19 |
| Sobre 610 mm de diámetro | ≤500 Pa SP | Hasta 300 | B | 3 | 64 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 |
| | | 300-500 | B | 3 | 19 | B | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | B | 3 | 19 | B | 3 | 38 | B | 3 | 38 | B | 3 | 38 |
| | ≥501 Pa SP | Hasta 300 | C | 3 | 64 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 |
| | | 300-500 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | C | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 |
| **Ventiladores centrífugos** | | | | | | | | | | | | | | |
| Hasta 560 mm de diámetro | Todos | Todos | B | 2 | 6 | B | 3 | 19 | B | 3 | 19 | B | 3 | 38 |
| Sobre 610 mm de diámetro | ≤30 | Hasta 300 | B | 3 | 64 | B | 3 | 89 | B | 3 | 89 | B | 3 | 89 |
| | | 300-500 | B | 3 | 38 | B | 3 | 38 | B | 3 | 64 | B | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | B | 3 | 19 | B | 3 | 19 | B | 3 | 19 | B | 3 | 38 |
| | ≥37 | Hasta 300 | C | 3 | 64 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 |
| | | 300-500 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | C | 3 | 25 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 |
| **Ventilador propulsor axial** | | | | | | | | | | | | | | |
| Montado a muro | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 1 | 6 | A | 1 | 6 | A | 1 | 6 |
| Montado a techo | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 1 | 6 | B | 4 | 38 | D | 4 | 6 |
| **Bombas de calor, Fan-Coils, Unidades para salas de computadores** | Todos | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A/D | 3 | 38 |
| **Unidades condensadoras** | Todos | Todos | A | 1 | 6 | A | 4 | 19 | A | 4 | 38 | A/D | 4 | 38 |
| **Unidades Manejadoras (AH, AC, H y V)** | | | | | | | | | | | | | | |
| Todas | ≤7.5 (10) | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 |
| | ≤11 (15) | Hasta 300 | A | 3 | 19 | A | 3 | 89 | A | 3 | 89 | C | 3 | 89 |
| | ≤1 kPa SP | 300-500 | A | 3 | 19 | A | 3 | 64 | A | 3 | 64 | A | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | A | 3 | 19 | A | 3 | 38 | A | 3 | 64 | A | 3 | 38 |
| | >11 | Hasta 300 | B | 3 | 19 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 | C | 3 | 89 |
| | > 1 kPa SP | 300-500 | B | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 64 |
| | | Sobre 501 | B | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 |
| **Equipos Rooftop** | Todos | Todos | A/D | 1 | 6 | D | 3 | 19 | Consultar a especialista acústico | | | | | |
| **Equipos rotatorios ducteados** | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| Pequeños ventiladores, cajas de ventiladores con motor | ≤300 L/s | Todos | A | 3 | 13 | A | 3 | 13 | A | 3 | 13 | A | 3 | 13 |
| | ≥301 L/s | Todos | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 | A | 3 | 19 |
| **Generadores accionados por motor** | Todos | Todos | A | 3 | 19 | C | 3 | 38 | C | 3 | 64 | C | 3 | 89 |

**Tipos de Bases:**

A. Sin base, aisladores directamente montados al equipo
B. Rieles o base de acero estructural
C. Base de inercia de concreto
D. Base tipo acera (curb)

**Tipo de Aisladores:**

1. Pad de neopreno
2. Soporte o colgador de neopreno
3. Soporte o colgador de resorte
4. Aislador de resorte contenido

En las secciones 2.2.1 y 2.2.2, se detallan los distintos tipos de aisladores de vibración y tipos de bases, respectivamente.

### 2.2.1. Tipos de aisladores de vibración

Es importante diferenciar los aisladores de vibración con los amortiguadores, que es lo que normalmente se ve en las especificaciones técnicas por error de los proyectistas [3].

El objetivo de un aislador de vibración es atenuar la transmisión de vibraciones, mientras que el objetivo de un amortiguador es disipar energía mecánica [4]

Existen aisladores de resorte, aisladores de neopreno, aisladores de aire comprimido y colgadores de resorte o neopreno (hangers). La diferencia entre estos elementos es la deflexión, carga y/o fuerza sísmica que pueden tolerar, siendo unos mejores para ciertas aplicaciones que otros. De forma general, los aisladores de resorte tienen una mayor deflexión, lo que implica que pueden aislar una frecuencia más baja (al compararlo con los aisladores de neopreno). Por otra parte, los aisladores de aire comprimido son utilizados para frecuencias muy bajas y en casos muy especiales.

### 2.2.2. Tipos de bases

Existen cuatro tipos de base, acorde a lo especificado por ASHRAE, las cuales suelen utilizarse entre el equipo que se quiere aislar y el aislador de vibración. Las cuatro tipos de bases son:

- **Sin base**: En este caso, los equipos se montan directo sobre los aisladores de vibración. Esto es usual en las calderas, compresores, grupos electrógenos y enfriadores de agua (chillers).
- **Bases de acero:** Se utilizan cuando los equipos no pueden ser soportados sobre apoyos puntuales. Normalmente se utilizan en unidades manejadoras de aire, ventiladores y torres de enfriamiento.
- **Bases de concreto:** Se utilizan para proporcionar estabilidad y mejorar la distribución de las masas de inercia. Además, tiende a bajar el centro de gravedad hasta la línea horizontal de fijación de los aisladores [5]. Generalmente se utilizan en bombas de agua.
- **Bases tipo solera:** Se utilizan para equipos rooftop soportados con solera y tienen aisladores de resorte incorporados.

## 2.3. Recomendaciones de Diseño

A continuación se muestran algunas recomendaciones de diseño para distintos tipos de equipos. Los diseños están basados en las recomendaciones entregadas por la compañía norteamericana Mason Industries Inc [6].

### 2.3.1. Bombas de agua de doble succión

Deben estar sobre una base de inercia de concreto que ayude a distribuir el peso de la bomba de forma más homogénea y disminuir el centro de gravedad del equipo. Por otra parte, la base de inercia debe estar montada sobre aisladores de vibración. De igual forma, los soportes de codos deben estar sobre la base de inercia. Además, como las bombas transportan líquidos, se deben utilizar juntas flexibles que ayuden a eliminar las vibraciones producidas por el equipo y que se propagan a través de las cañerías. Respecto a la selección del aislador, se debe considerar el peso del motor, de la bomba, el peso del agua, el peso de los codos y el peso de la base. En la Figura 1 se muestra un esquema conceptual de instalación.

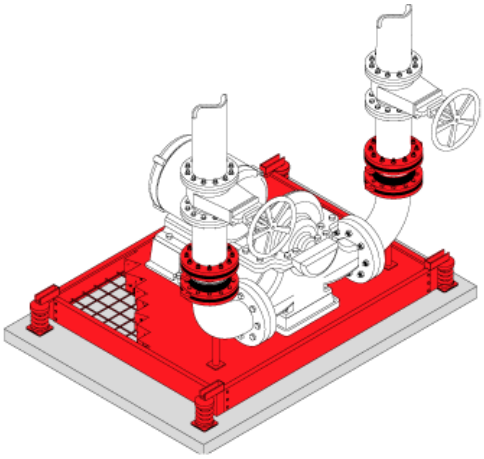


Figura 1. Instalación tipo de una bomba de agua de doble succión. Fuente: [4]

### 2.3.2. Bombas centrífugas

Deben estar sobre una base de acero y la base debe estar montada sobre aisladores de vibración. De igual forma, los soportes de codos deben estar sobre la base de acero. Además, como las bombas transportan líquidos, se deben utilizar juntas flexibles que ayuden a eliminar las vibraciones producidas por el equipo y que se propagan a través de las cañerías. Respecto a la selección del aislador, se debe considerar el peso del motor, de la bomba, el peso del agua, el peso de los codos y el peso de la base. En la Figura 2 se muestra un esquema conceptual de instalación.

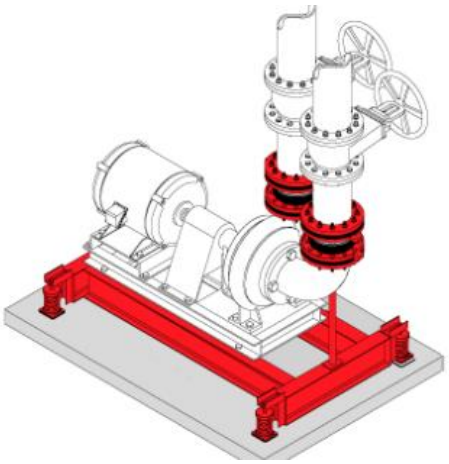


Figura 2. Instalación tipo de una bomba de agua centrífuga. Fuente: [4]

### 2.3.3. Enfriadores de Agua (Chillers)

Deben instalarse directo sobre aisladores de vibración (normalmente de resorte) y utilizar juntas flexibles en sus cañerías de conexión. En la Figura 3 se muestra un esquema conceptual de instalación.

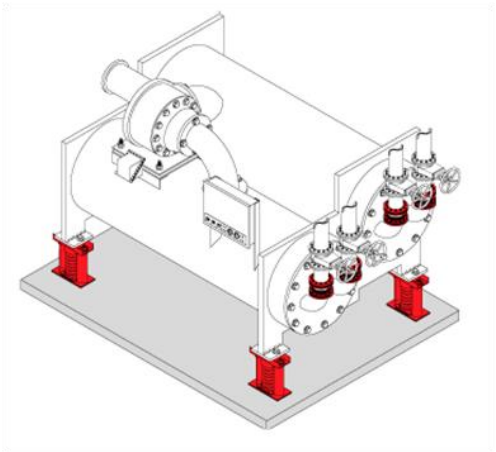


Figura 3. Instalación tipo de enfriadores de agua (chillers). Fuente: [4]

### 2.3.4. Torres de enfriamiento

Deben instalarse directo sobre aisladores de vibración (normalmente de resorte) y utilizar juntas flexibles en sus cañerías de conexión. En la Figura 4 se muestra un esquema conceptual de instalación.

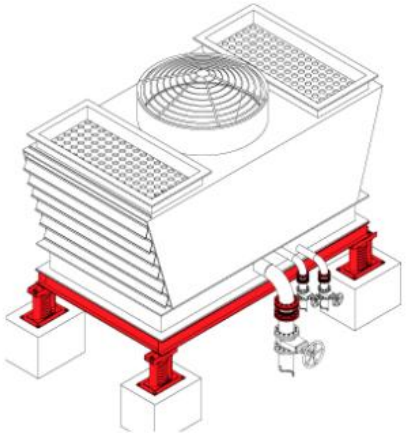


Figura 4. Instalación tipo de enfriadores de agua (chillers). Fuente: [4]

## 3. RECINTOS CRÍTICOS

Si bien el control de vibraciones es un problema que se debe enfrentar en cualquier proyecto que tenga equipamiento mecánico, existen algunos tipos de recintos que es imperativo que contemplen un sistema de control de vibraciones. Recintos críticos como Datacenters, Hospitales, Hoteles y Oficinas deben considerar un sistema de control de vibraciones en el equipamiento mecánico del edificio, con el fin de lograr un correcto funcionamiento del recinto.

## 4. APLICACIONES EN PROYECTOS

A continuación se muestran algunas instalaciones de equipamiento mecánico con aisladores de vibración y/o juntas flexibles en proyectos desarrollados en Chile por la compañía Silentium, Ingeniería del Silencio.

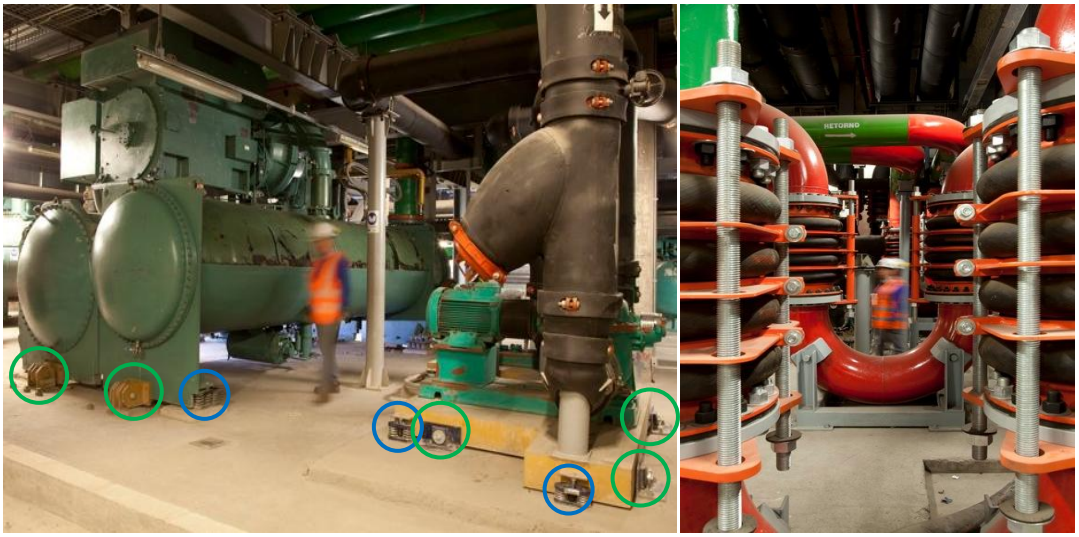


Figura 5. Aplicación en piso mecánico de Mall Comercial. Aisladores de vibración de resorte (círculos azules) y restrictores sísmicos (círculos verdes) en enfriadores de agua (chillers) y bombas de agua y juntas de dilatación.



Figura 6. Aplicación en sala de clima de Hospital. Aisladores de vibración de resorte (círculos azules) con restricción sísmica en bombas de agua y juntas de dilatación.



Figura 7. Aplicación en sala de grupo electrógeno de Planta de Gas. Aisladores de vibración de neopreno con restricción sísmica (círculos azules) en grupos electrógenos y colgadores de resorte (círculos verdes) con arriostramientos sísmicos en silenciadores de escape de gases.

## 5. CONCLUSIONES

Se entregaron criterios de diseño para el correcto aislamiento de vibraciones de equipamiento mecánico, a través de las recomendaciones que entrega la ASHRAE.

Para realizar un correcto aislamiento de vibraciones de un equipo, se debe conocer el tipo de equipo que se necesita aislar, su potencia, sus revoluciones por minuto y la luz de losa donde está instalado el equipo.

Recintos como Datacenters, Hospitalas, Hoteles y Oficinas cuentan una gran variedad de equipos que generan vibraciones nocivas, por lo cual, son proyectos en los que se requiere el apoyo de un especialista acústico para diseñar un sistema de control de vibraciones efectivo.

El control de vibraciones de equipamiento mecánico es un problema que está presenta en cualquier proyecto constructivo, lo que genera oportunidades de trabajo para especialistas acústicos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se podría haber realizado sin la cooperación de la compañía Silentium, Ingeniería del Silencio, ya que facilitaron toda la información de la sección de aplicaciones en proyectos.

## REFERENCIAS

[1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc (2011). Ashrae handbook: HVAC applications. SI edition.
[2] Sound Research Laboratories Ltd. Noise Control in Industry. CRC Press; 3 edition (December 31, 1990).
[3] Bastián, N.; Galleguillos, C. Control de Vibraciones y Restricción Sísmica de Componentes y Sistemas no Estructurales en Chile. IX Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2014. Valdivia, Chile (2014).
[4] E. E. Ungar (1992). Vibration isolation. 11 in Noise and Vibration Control Engineering, L.L. Beranek and I.L. Ver, Eds, Wiley, New York.
[5] Gerges, S.N.Y.; Arenas, J.P. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones, 2da Ed., NR Editora, Florianópolis (2010).
[6] Mason Industries Inc. Mason Black Catalog. May 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÕES AMBIENTAIS NA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS - DOIS CASOS DE ESTUDO

PACS: 43.40.Kd

Diogo Mateus; Telmo Dias Pereira
Departamento de Engenharia Civil, FCT da Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
Tel. +351-239797196
Fax +351-239797190
diogo@dec.uc.pt ; telmo@dec.uc.pt

## ABSTRACT

The general increase in noise emissions, and in particular from environmental vibrations in the vicinity of structurally sensitive buildings, as with the majority of architectural and historical heritage, is a degradation factor of these buildings. In this paper we present two case studies, where we proceeded to monitoring vibrations and ambient noise in order to assess the impact of any excessive noise levels and vibration on the structure of two old buildings. The used noise sources correspond to the performance of live music shows, with very high sound levels and issued within close distance of such buildings.

## RESUMO

O aumento generalizado das emissões de ruído e em especial de vibrações ambientais na proximidade de edifícios estruturalmente sensíveis, como acontece com a generalidade do património arquitetónico e histórico, constitui um fator de degradação destes edifícios. No presente artigo são apresentados dois caso de estudo, onde se procedeu à monitorização de vibrações e de ruído ambiente, com vista a avaliar o impacto de eventuais níveis sonoros excessivos e de vibrações sobre a estrutura de dois edifícios antigos. As fontes principais consideradas corresponderam à realização de espetáculos de música ao vivo, com níveis sonoros muito elevados e emitidos a curta distância dos referidos edifícios.

## 1. INTRODUÇÃO

A exposição de edifícios a vibrações ambientais, decorrentes de solicitações externas e internas, pode traduzir-se não só num fator de incomodidade, em particular para utilizações sensíveis como os edifícios habitacionais, como também num fator de degradação para os próprios edifícios, em particular em edifícios estruturalmente sensíveis. São exemplos de fontes tradicionais de solicitações dinâmicas dos edifícios: os sismos; o desmonte de maciços; a exploração de pedreiras; a cravação de estacas; a demolição de edifícios por implosão; o tráfego ferroviário, algumas atividades industriais; e o funcionamento de equipamentos com partes rotativas de elevada potência [1,2,3]. No interior dos edifícios, a multiplicidade de equipamentos mecânicos, nomeadamente em instalações técnicas, pode originar também vibrações significativas, mas estas traduzem-se geralmente sobretudo sob a forma de ruído, não tendo habitualmente impacto significativo sobre a sua estrutura.

Neste contexto, é apresentado de seguida um resumo dos critérios de admissibilidade previstos em documentação de referência nacional e em normas internacionais, e, nos pontos seguintes, são apresentados e avaliados dois casos de estudo sujeitos a vibrações elevadas, mas nestes casos devido essencialmente a níveis de ruído excessivos, emitidos na sua proximidade. Apesar destas fontes não se enquadrarem nas fontes tradicionais de solicitações dinâmicas dos edifícios, em situações extremas, a sua influência sobre os edifícios e sobre os seus ocupantes pode ser preocupante.

O primeiro caso de estudo é referente ao Mosteiro de Santa Clara a Velha, construído em Coimbra durante o século XIV, onde se procedeu à monitorização de vibrações e de ruído ambiente, com vista a avaliar o impacto de eventuais níveis sonoros excessivos e de vibrações sobre a estrutura deste monumento (no âmbito de uma prestação de serviços através da ACIV, sediada no DEC-FCTUC). Este estudo foi realizado na sequência do desprendimento e queda de um elemento construtivo da abóbada deste monumento. Neste caso as principais fontes de ruído e de vibrações ambientais correspondem ao tráfego rodoviário em vias próximas, ao funcionamento pontual de equipamentos mecânicos nas proximidades, à realização esporádica de espetáculos musicais com níveis sonoros muito elevados (nas proximidades e mesmo no seu interior) e a fogo-de-artifício nas proximidades (aquando da celebração de algumas festividades da cidade). As medições de vibrações, e simultaneamente de ruído ambiente, foram realizadas para quatro tipos de situações distintas: para a situação normal, do dia-a-dia, onde a principal fonte corresponde ao tráfego rodoviário; para uma situação de ruído excessivo no interior do Mosteiro; para uma situação de realização de espetáculos de música ao vivo, com níveis sonoros muito elevados; e para a situação de fogo-de-artifício.

O segundo caso corresponde a um edifício antigo classificado (com um corpo habitacional e uma capela, do século XVII), numa pequena aldeia no norte de Portugal, cuja solicitação principal avaliada correspondeu à realização das festas populares de verão, que decorem anualmente durante cerca de uma semana. Apesar de níveis de ruído excessivos não constituírem geralmente um problema para a estrutura dos edifícios, neste caso, dada a grande proximidade entre o edifício monitorizado e o palco montado para essa festa popular (cerca de 10 m) e a elevada potência do sistema de som utilizado, que hoje em dia é bastante frequente neste tipo de festividades, mesmo em pequenos espetáculos musicais, como é o caso, as velocidades de vibração da estrutura do edifício podem atingir valores preocupantes.

## 2. DOCUMENTAÇÃO NORMATIVA APLICÁVEL

Apesar de existir no nosso país legislação específica e detalhada para a prevenção e controlo de ruído (no Regulamento Geral do Ruído, aprovado pelo Decreto Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro), não existem requisitos regulamentares com vista ao controlo de vibrações excessivas em edifícios, existindo apenas uma norma Portuguesa, publicada há mais de 30 anos, que se aplica especificamente a vibrações impulsivas e cuja propagação ocorre sobretudo através do solo de fundação (NP 2074:1983). Deste modo, nos parágrafos seguintes são apresentados, de forma sumária, diferentes critérios de admissibilidade indicados em documentos técnicos nacionais e internacionais, na avaliação de vibrações. Estes critérios baseiam-se na medição da velocidade de vibração (em mm/s), expressa na generalidade dos casos no valor máximo de pico (p.p.v.) e pontualmente no valor eficaz (r.m.s.).

De acordo com a norma NP2074 [4], a grandeza utilizada corresponde à velocidade máxima de pico, medida na fundação do edifício, durante a ocorrência da solicitação, e determinada a partir das três componentes da velocidade máxima de vibração, medidas nas três direções (x, y e z). Para efeitos de avaliação, este valor máximo não deve exceder o valor da velocidade de vibração limite, definido em função das características do terreno de fundação, do tipo de construção e do número médio de solicitações diárias, conforme indicado na Tabela 1. Esta norma foi entretanto revista, sem que exista a sua publicação oficial, tendo sido propostas pequenas alterações a estes limites, decorrentes em particular da introdução de um novo intervalo de solicitações, com a inclusão de um número de solicitações diárias superior a 100 e

a criação de correspondentes limites inferiores de velocidade máxima da vibração, com valor próximo de metade do valor indicado para 3 ou menos solicitações diárias [2,3].

Tabela 1. Valores limites da velocidade máxima (em módulo) da vibração impulsiva na base da edificação, impostos pela norma NP2074.

| $v_L$ (mm/s) Tipo de solo ► ▼ Tipo de construção | Incoerentes soltos e coerentes moles (c<1000m/s) | Incoerentes compactos e coerentes duros (1000m/s<c<2000m/s) | Coerentes rijos (c>2000m/s) |
|---|---|---|---|
| Sensíveis | 1,75 - 2,5 | 3,5 - 5 | 7 - 10 |
| Correntes | 3,5 - 5 | 7 - 10 | 14 - 20 |
| Reforçadas (de betão armado) | 10,5 - 12,5 | 21 - 30 | 42 - 60 |

Nota: Os primeiros valores são adequados para um número diário de solicitações superior a 3; e os segundos para três ou menos solicitações diárias.

No caso de vibrações continuadas, e apesar de também ainda não ter sido publicado em norma, a comissão CT28 elaborou um documento onde propôs os limites de velocidade de vibração eficaz, segundo a componente mais significativa, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Valores limite de velocidade de vibração eficaz (continuada), segundo a componente mais significativa, propostos pela CT28 para futura publicação de norma.

| $v_{ef}$ (mm/s) Tipo vibração ► ▼ Tipo de construção | Duração inferior a 1 hora/dia | Duração superior a 1 hora/dia |
|---|---|---|
| Sensíveis (monumentos e outros edifícios históricos, hospitais, casas antigas em centros históricos, depósitos de água, chaminés de alvenaria, etc.) | 1 | 0,7 |
| Correntes (edifícios de habitação em boa alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc.) | 2 | 1,8 |
| Reforçadas (edifícios com estrutura em betão armado, edifícios industriais recentes, etc.) | 5 | 5 |

Vários países da europa adotaram também limites para a velocidade de vibração de pico, onde se destaca a norma alemã DIN 4150 [5], a norma italiana UNI 9916 [6], a e as normas inglesas BS 7385 [7,8] e BS 5228 [9]. Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos limites da velocidade de vibração de pico apresentados por estas normas, considerando apenas os limites mais restritivos, neste caso, retirados das normas DIN 4150 e UNI 9916. A norma BS 5228 apresenta também limites com vista a evitar danos estéticos, que supostamente são mais restritivos que os referentes a danos estruturais, mas, nesta norma, estes acabam por ser menos conservadores que os indicados nesta Tabela 3.

Tabela 3. Valores limites da velocidade de vibração de pico (em mm/s) propostos pelas normas DIN 4150 e UNI 9916.

| Tipo de edifício | Danos estruturais para vibrações de curta duração | | | | Danos estruturais para vibrações permanentes |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Na fundação do edifício* | | | Pontos altos | *Toda a estrutura* |
| | De 1 a 10 Hz | De 10 a 50 Hz | > 50 Hz | Global | Global |
| Ed. industriais e construções estruturalmente similares | 20 | 20 (f=10Hz) a 40 (f=50 Hz) | 40 (f=50Hz) a 50 (f≥100 Hz) | 40 | 10 |
| Ed. residenciais e construções similares | 5 | 5 (f=10Hz) a 15 (f=50 Hz) | 15 (f=50Hz) a 20 (f≥100 Hz) | 15 | 5 |
| Ed. sensíveis (monumentos e outros edifícios históricos) | 3 | 3 (f=10Hz) a 8 (f=50 Hz) | 8 (f=50Hz) a 10 (f≥100 Hz) | 8 | 2,5 |

Em relação à incomodidade para os seres humanos, no interior dos edifícios onde se requer concentração e sossego, não existe normalização portuguesa aplicável, mas o LNEC propõe o critério indicado na Tabela 4 [3].

Tabela 4. Valores limite de velocidade de vibração eficaz (continuada), segundo a componente mais significativa (em mm/s), propostos pelo LNEC para situações de incomodidade [3].

| $v_{ef}$ (mm/s) | Sensação |
|---|---|
| $v_{ef} < 0{,}11$ | Nula |
| $0{,}11 < v_{ef} < 0{,}28$ | Percetível, suportável para pequena duração |
| $0{,}28 < v_{ef} < 1{,}10$ | Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho |
| $v_{ef} > 1{,}10$ | Muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho |

## 3. CONDIÇÕES DE ENSAIO E EQUIPAMENTO UTILIZADO

As medições de ruído ambiente e de vibrações, cujos resultados se apresentam no presente artigo, foram realizadas utilizando o seguinte equipamento (ver Figuras 1 e 2):

- Analisador portátil (Symphonie - 01dB), ligado a um PC portátil, com a aquisição e o tratamento das medições efetuados através de software específico.
- Acelerómetros do tipo ICP (PCB Piezotronics 352B).
- Sonómetro integrador (Solo Premium - 01dB, com microfone MCE212 e pré-amplificador PRE21S).
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica de ruído aéreo (DO12 – 01dB; ML 800 – INTER; RD10 – 01dB), apenas para o primeiro caso de estudo, para simulação de níveis de ruído ambiente muito elevados, no interior do Mosteiro.

Em ambos os casos de estudo as vibrações foram registadas sob a forma de acelerações, no domínio do tempo (incluindo medição áudio com 1250 leituras por segundo) e em frequência. Para obtenção das correspondentes velocidades de vibração, ao longo do tempo, a partir do registo das acelerações, foi aplicado um algoritmo FFT para obtenção da resposta em frequência da aceleração, calculada a velocidade em frequência e, finalmente aplicado o algoritmo inverso IFFT, para obtenção da resposta no tempo para a velocidade de vibração.




Figura 1 - 1º caso de estudo: locais de emissão de ruído e equipamentos de emissão e de medição: a) fonte omnidirecional; b) sonómetro no interior; c) analisador p/ registo de vibrações; d) sonómetro com tripé de 3 m no exterior.

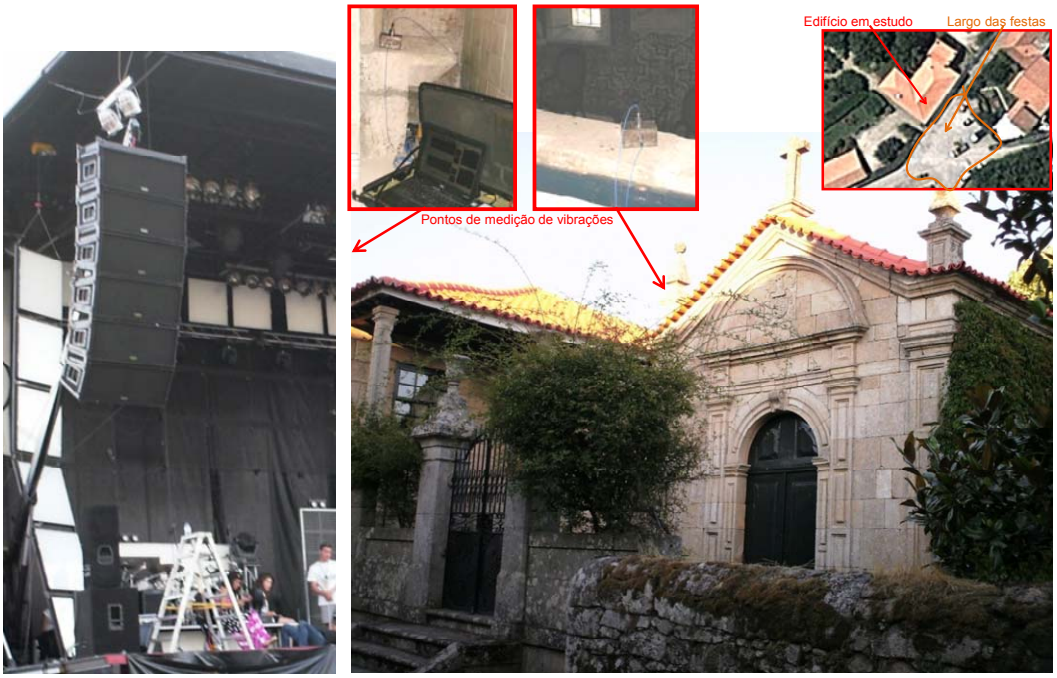



Figura 2 - 2º caso de estudo: fotografias ilustrativas do edifício monitorizado, da dimensão do palco e do sistema de som utilizado e do equipamento de medição utilizado.

## 4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS E DE VIBRAÇÕES

As medições realizadas nos dois casos de estudo aqui apresentados, para diferentes condições de ensaio e de solicitações, permitiram obter grande quantidade de informação e uma análise exaustiva de ambas as situações, que foram objeto de estudos específicos anteriormente realizados. No âmbito do presente artigo apenas se apresentam alguns dos resultados considerados mais relevantes e exemplificativos.

### 4.1 Mosteiro de Santa Clara a Velha

Na Figura 3 são apresentados os níveis sonoros médios obtidos sobre a cobertura do mosteiro, no domínio da frequência, respetivamente para a parte mais desfavorável dos concertos e para o fogo-de-artifício. Na Figura 4 são apresentados os valores instantâneos da velocidade da vibração (no domínio do tempo), obtidos segundo o eixo horizontal (na direção perpendicular ao desenvolvimento do elemento em planta) para o ponto da estrutura situado na cobertura do Mosteiro (mais sensível às emissões exteriores) e para as duas situações mais desfavoráveis (períodos mais desfavoráveis dos concertos (a) e do fogo-de-artifício (b)). Na Figura 5 são apresentados os valores máximos da velocidade de vibração em frequência, também no ponto da estrutura da cobertura do Mosteiro, para dois concertos distintos e para o fogo-de-artifício. Refira-se que, a distância do palco dos concertos ao Mosteiro é da ordem de 170m e os rebentamentos do fogo-de-artifício ocorreram sensivelmente a 400m do Mosteiro.

Considerando todas as medições de vibrações efetuadas, e os diferentes cenários avaliados em cada ponto de medição, resultam aproximadamente os valores máximos de pico e valores médios (para situações de nível de som "quase contínua") da velocidade de vibração, para a componente mais desfavorável e para o global nas direções x, y e z, conforme indicado na Tabela 4. Além dos registos das vibrações, foram registados em simultâneo os níveis sonoros no exterior, sobre a cobertura do mosteiro, onde se registaram, para a situação de concerto mais desfavorável, que ocorreu entre as 02 e as 04h de 09/05/2013, valores médios de LAeq próximos de 72 dB(A), que por si só já é muito elevado, mas com a agravante do correspondente valor sem ponderação “A” (Leq) atingir cerca de 87 dB.

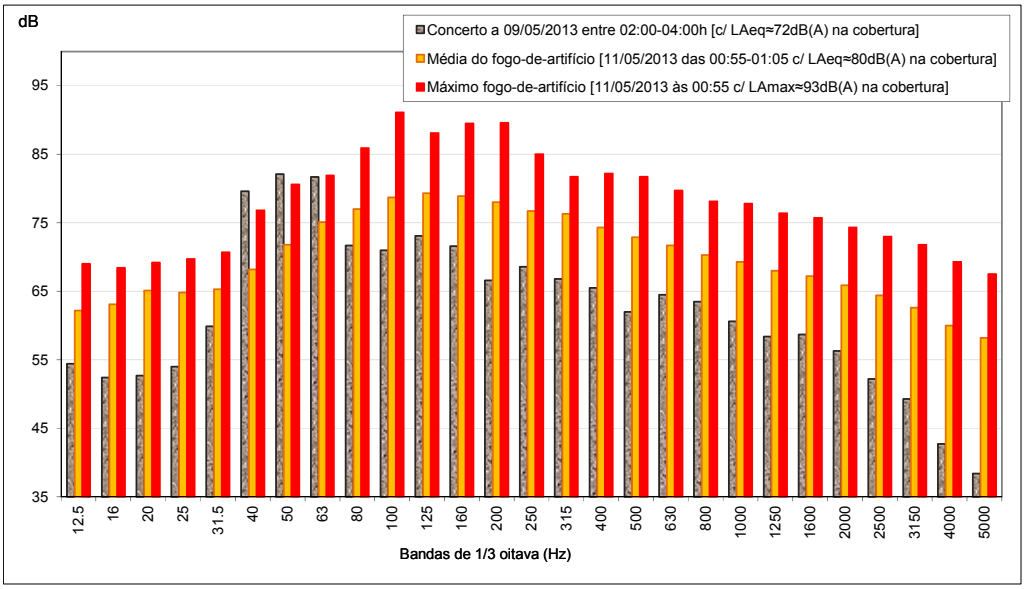



Figura 3 –Níveis sonoros médios (em dB), no domínio da frequência e o valor global LAeq, obtidos no exterior, sobre a cobertura do Mosteiro.

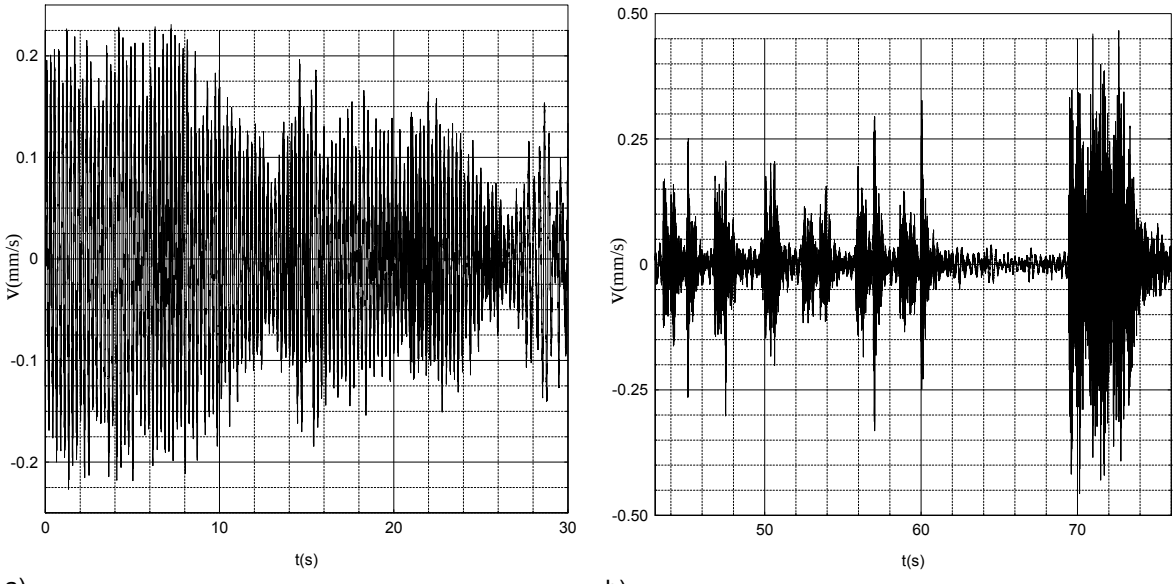



Figura 4 - Velocidade da vibração instantânea (componente horizontal), na cobertura do Mosteiro: a) para a parte mais desfavorável do concerto [LAeq≈73dB(A)]; b) para o fogo-de-artifício [com LAeq(10min)≈80dB(A) e LAeq(max.10s)≈93dB(A)].

Tabela 5. Velocidades máximas de pico e valores médios (em mm/s) no Mosteiro, para a componente mais desfavorável e para o global nas direções x, y e z, para os cenários avaliados mais desfavoráveis.

| Situação | Tipo de velocidade de vibração | No interior (arco intermédio do Mosteiro) | No exterior (cobertura do Mosteiro) |
|---|---|---|---|
| Situação mais desfavorável com concerto | máxima de pico - horizontal | 0,20 | 0,25 |
| | máxima de pico - global | 0,30 | 0,36 |
| | média - horizontal | 0,03 | 0,07 |
| | média - global | 0,05 | 0,10 |
| Com fogo-de-artifício | máxima de pico - horizontal | - | 0,50 |
| | máxima de pico - global | - | 0,70 |

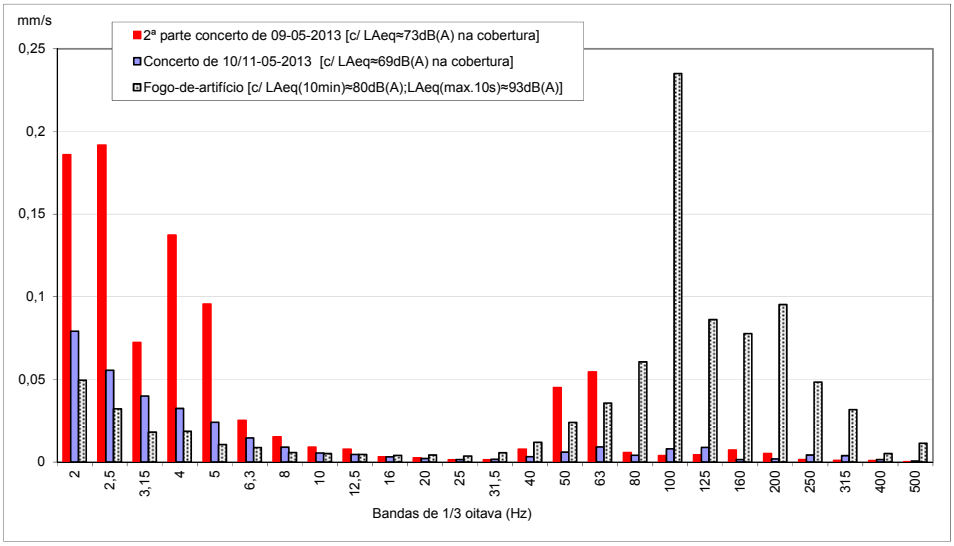



Figura 5 - Valores máximos da velocidade de vibração em frequência (componente horizontal, para o pico máximo, com $\Delta t = 20ms$ ), na cobertura do Mosteiro, para 2 concertos distintos e para o fogo-de-artifício.

Da análise dos resultados obtidos no Mosteiro, é possível concluir que, mesmo para as situações e cenários mais desfavoráveis, a amplitude das velocidades de vibração é inferior aos respetivos limites, indicados nas diferentes normas que serviram de referência a este trabalho. Na situação mais desfavorável (concerto no Parque da Canção) obteve-se um valor da velocidade efetiva (longa duração) próximo de 10% do limite aplicável. Para o caso do fogo-de-artifício (curta duração) o valor obtido foi próximo de 9% do limite aplicável.

### 4.2 Edifício habitacional antigo e capela do século XVII

No segundo caso de estudo, foram realizadas medições do mesmo tipo, mas neste caso com o registo de níveis sonoros muito superiores devido à grande proximidade entre os recetores sensíveis e o palco (localização das fontes principais de ruído), onde a distância era da ordem de 10 m no caso do edifício antigo e de cerca de 20 m no caso da capela. Na Figura 6 são apresentados os resultados de medições de ruído ambiente, no exterior, e de vibrações estruturais, na parede de fachada do edifício antigo classificado (num ponto mais desfavorável), registados durante as referidas festas populares de verão.

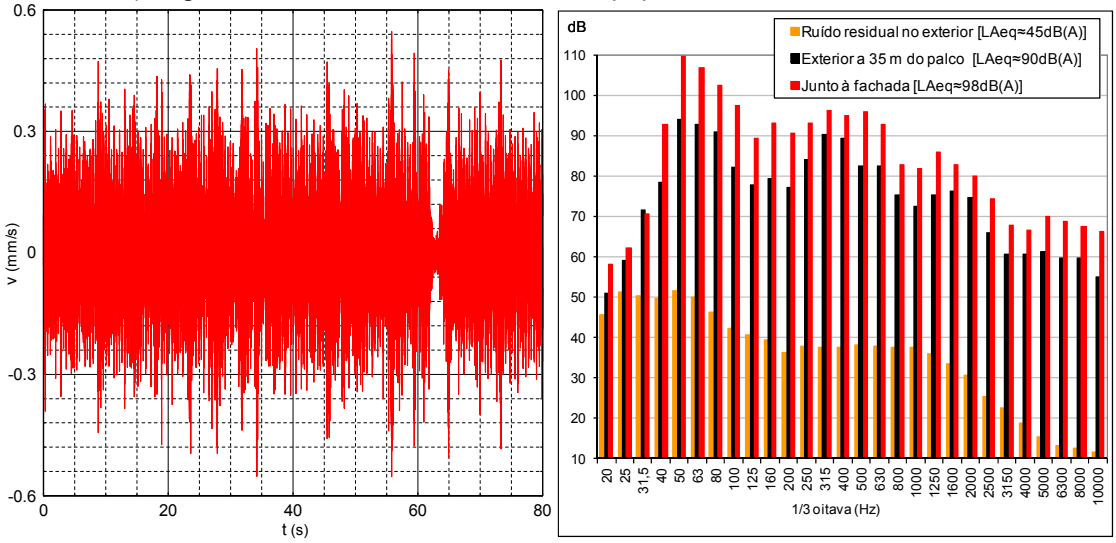



Figura 6 – Velocidade de vibração instantânea registada na parede de fachada do edifício antigo (à esquerda) e média dos espetros dos níveis de ruído (à direita), registados no exterior antes e durante a atuação de uma das bandas, nas festas populares de verão.

Da análise dos resultados anteriores, complementada com os restantes resultados obtidos durante os ensaios, verifica-se que, embora a velocidade de vibração, que no exemplo apresentado corresponde à componente horizontal, registada a cerca de 3 m acima da cota de piso exterior, seja significativamente inferior aos limites indicados na normalização aplicável, a sua continuação acelera o processo de degradação, com possibilidade de destacamento e queda de eventuais elementos instáveis. Neste ponto de medição, a velocidade máxima de pico global (x, y e z) foi próxima de 0,8 mm/s, enquanto que a velocidade efetiva na direção mais desfavorável (horizontal) foi próxima de 0,08 mm/s. Estes valores correspondem a cerca de 32% e 11% dos respetivos limites aplicáveis, para estruturas sensíveis. Nos elementos construtivos mais leves no interior do edifício, nomeadamente no pavimento em madeira, as velocidades de vibração eram muito superiores, configurando uma situação de incomodidade de vibrações, mas aqui a incomodidade relativamente ao ruido era muito mais intensa, passando de valores médios de LAeq no interior do edifício inferiores a 25 dB(A), na ausência das referidas festividades, para valores próximos de 60 dB(A), durante as festividades.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados dois casos de estudo (mosteiro e edifício antigo classificado), ambos estruturalmente sensíveis e com vibrações elevadas originadas por níveis de ruído excessivos, emitidos na sua proximidade. Apesar das velocidades de vibração não atingirem valores muito alarmantes para a estrutura destes edifícios, os valores registados são bastante relevantes no que se refere a eventuais “danos estéticos”. Para uma ação continuada deste tipo de solicitações, com amplitudes semelhantes às registadas neste trabalho, é natural o aparecimento e desenvolvimento de alguma fissuração na estrutura e nos elementos de compartimentação destes edifícios, podendo também verificar-se uma aceleração do processo de degradação e eventual queda de elementos mais instáveis, nomeadamente os de maior esbelteza, suspensos, de extremidade ou que se encontrem fissurados.

Face aos resultados obtidos, e ainda que não sejam muito alarmantes, em situações semelhantes às aqui analisadas, é recomendável a implementação de medidas para minimização de ruído e vibrações. Para o efeito, é importante a limitação dos níveis sonoros emitidos, em particular para baixas frequências (controlando os “sub graves”). No caso do fogo-de-artifício, este controlo poderá ser concretizado com a limitação das cargas explosivas a utilizar. São também muito importantes, nestes casos, as inspeções regulares e detalhadas, de forma a identificar eventuais situações de maior fragilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bachmann, H., Ammann, W., Vibrations in Structures Induced by Man and Machines. IABSE Structural. Engineering Documents, 1987.
[2] Bernardo, P., Gama, D., Sugestões para melhoria da Norma Portuguesa de controle de vibrações em construções. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 2006.
[3] Schiappa F., Patrício J., Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais. Ingenium, 2ª Série, Nº 72, Janeiro 2003, p. 84-88.
[4] NP 2074:1983. Valores limite da velocidade máxima em módulo da vibração na base da edificação. Normas: IPQ, Portugal, 1983.
[5] DIN 4150-1,3:1999. Structural vibration. Part 1: Prediction of vibration parameters. Part 3: Effects of vibration on structures. Deutsches Institut fur Normung, Berlin, 1999.
[6] UNI 9916:2004. Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2004.
[7] BS 7385-1:1990. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. British Standards Institution, London, 1990.
[8] BS 7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. British Standards Institution, London, 1993.
[9] BS 5228-1,2:2009. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Part 1: Noise, Part 2: Vibration. British Standards Institution, London, 2009.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ANALISIS DE MECANISMOS DE EXTRACCIÓN TÉRMICA EN ALTAVOCES DE BAJA FRECUENCIA

PACS: 43.40.Cw

Ramis,Jaime[1]; Enrique Segovia[2], Carbajo, Jesús; Martinez, José[1]
[1]Departamento de FISTS, Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España. jramis@ua.es
[2]Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante.

## ABSTRACT

The increase of voice coil temperature in electrodynamic speakers has an impact on the performance of these transducers. Firstly, the heating coil does change its impedance and secondly, this energy reaches the magnet decreasing the value of magnetic field. In this paper, a method of analyzing the possible impact the implementation of various mechanisms to sidestep these difficulties is presented.

## RESUMEN

El aumento de la temperatura de la bobina, en altavoces electrodinámicos tiene una repercusión en el rendimiento de estos transductores. Por una parte, el calentamiento de la bobina hace que cambie su impedancia y, por otra, esta energía llega al imán disminuyendo el valor del campo magnético. En esta comunicación, de carácter marcadamente experimental, se presenta un método de análisis de las repercusiones que pueden tener la aplicación de diversos mecanismos que soslayen estas dificultades.

## 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

El rendimiento del altavoz, $\eta$ , se define como el cociente entre la potencia útil radiada, $W_R$ (por la cara delantera del diafragma) entre la potencia eléctrica total suministrada al altavoz, $W_{EC}$:

$$\eta = \frac{W_{útil}}{W_{total}} 100\% = \frac{W_R}{W_{EC}} 100\% \qquad \text{Ec.1}$$

En la figura 1 se presenta un corte transversa de un altavoz dinámico de radiación directa, en el que se pueden distinguir las dos piezas polares, la suspensión inferior y superor, el imán, el cilindro que constituye el soporte de la bobina, etc.

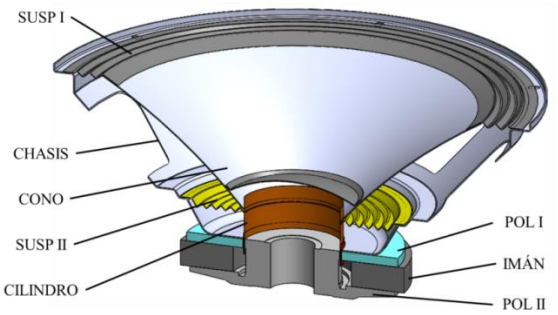



Figura 1: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

Para este tipo de transductores, se puede demostrar que el rendimiento viene dado por la ecuación:

$$\eta = 100 \frac{(Bl)^2 R_{MR}}{(R_g + R_E)|Z_{MT}|^2 + (Bl)^2 (2R_{MR} + R_{MD})} \% \qquad \text{Ec.2}$$

Donde Bl, producto del campo magnético por la longitud de la bobina, es el llamado factor de transformación electromecánico, $R_{MR}$ es la parte real de la impedancia mecánica de radiación, $R_E$ es la resistencia eléctrica de la bobina, *l* su longitud, $R_{MD}$ la resistencia mecánica asociada al diafragma y $Z_{MT}$ la impedancia mecánica total que tiene dos contribuciones, la mecánica pura y la de radiación (que tiene su origen en la fuerza de reacción del medio). Es decir:

$$\mathrm{Z_{MT}} = \mathrm{Z_{MD}} + 2\mathrm{Z_{MR}} \qquad \text{Ec.3}$$

Esta impedancia, vista desde el lado eléctrico, se conoce como impedancia del movimiento o impedancia mocional, $Z_{MOV}$ (Ec.4):

$$\mathrm{Z_{MOV}} = \frac{(\mathrm{Bl})^2}{\mathrm{Z_{MD}} + 2\mathrm{Z_{MR}}} = \frac{(\mathrm{Bl})^2}{\mathrm{Z_{MT}}} \qquad \text{Ec.4}$$

La impedancia eléctrica total, $Z_{ET}$, vista desde la salida del generador:

$$Z_{ET} = Z_E + Z_{MOV} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_{MD} + 2Z_{MR}} \qquad \text{Ec.5}$$

Dado que el altavoz sólo se va a usar en el margen frecuencial por encima de la frecuencia de resonancia mecánica del conjunto móvil y por debajo de la llamada frecuencia de resonancia electromecánica, en la que su respuesta es plana, la expresión del rendimiento se puede simplificar para esta zona. Al estar por encima de la frecuencia de resonancia mecánica, la impedancia mecánica total, $Z_{MT}$, presenta un carácter inductivo, es decir, el sistema, como se conoce en el ámbito de la electroacústica, está controlado por masa. Es decir:

$$Z_{MT} = (R_{MD} + 2R_{MR}) + j\left(M_{MD}\omega - \frac{1}{C_{MD}\omega} + 2X_{MR}\right) \quad \text{Ec.6}$$

puede aproximarse a:

$$Z_{MT} \cong j\omega(M_{MD} + 2M_{MR}) \cong jX_{MT} \quad \text{Ec.7}$$

y, por lo tanto:

$$|Z_{MT}|^2 \cong \omega^2 (M_{MD} + 2M_{MR})^2 \quad \text{Ec.8}$$

En ese margen de frecuencias también se cumple que:

$$(R_g + R_E)|Z_{MT}|^2 >> (Bl)^2 (2R_{MR} + R_{MD})^2 \quad \text{Ec.9}$$

Además, $R_{MR} = K_1\omega^2$ , siendo $K_1$ una constante que no depende de la frecuencia. Utilizando las anteriores relaciones , la expresión del rendimiento queda como sigue:

$$\eta \approx \frac{(Bl)^2 K_1 \omega^2}{(R_g + R_E)\omega^2 (M_{MD} + 2M_{MR})^2} = \frac{(Bl)^2 K_1}{(R_g + R_E)(M_{MD} + 2M_{MR})^2} \quad \text{Ec.10}$$

La expresión obtenida, válida para la zona de funcionamiento del altavoz, es independiente de la frecuencia.

Tanto la ecuación 2 como la 10 nos indican que el rendimiento depende del valor de $B^2$. Por tanto, dado que los cambios en la temperatura del imán, dan lugar a cambios en el valor de B que pueden llegar a reducciones de un 15%.

Un incremento de la temperatura de la bobina puede tener efectos adversos sobre el funcionamiento del altavoz. La temperatura de la bobina afecta directamente al valor de su resistencia eléctrica, de forma que si la temperatura aumenta, la resistencia también. Suponiendo que el voltaje aplicado al altavoz es constante, la resistencia aumenta y, por tanto (ley de Ohm) la intensidad de corriente disminuirá.

Este cambio en la intensidad de corriente, afectará directamente a la fuerza ejercida ya que es proporcional a ésta [1]. Como consecuencia, si la fuerza sobre el conjunto móvil disminuye, también disminuirá el rendimiento.

La discusión anterior tiene como consecuencia que el efecto del aumento de la temperatura se traducirá en un cambio en los parámetros que caracterizan al altavoz.

Para garantizar un buen funcionamiento del altavoz es necesario buscar caminos adicionales para que el flujo energético que tiene su origen en la bobina genere la menor cantidad de efectos adversos. Para ello, el punto de partida es que esa energía hay que llevarla hacia el exterior.

Es por tanto de gran interés, estudiar mecanismos [2,3,4] que dificulten e aumento de temperatura del imán. Para analizar el efecto de estas propuestas es conveniente disponer de procedimientos alternativos al de prueba y error. Los métodos numéricos nos proporcionan herramientas para llevar a cabo estas predicciones. Sin embargo, puede llegar a ocurrir que la dificultad en el uso de estas herramientas sea mayor del esperado ya que siempre es necesario un proceso de ajuste y calibrado del procedimiento debido a la gran cantidad de parámetros que están relacionados.

En este trabajo se presenta un procedimiento simplificado para analizar el efecto sobre el balance energético de pequeños cambios en el diseño de un altavoz de radiación directa.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Dado un altavoz como el que se muestra en la figura 1, se han realizado medidas indirectas de la temperatura en la bobina y se han comparado con las predicciones de un modelo numérico en elementos finitos. La peculiaridad del proceso reside en que, con el objeto de ajustar los

parámetros que presentan mayor incertidumbre se han ido ajustando previamente se han ajustado previamente los parámetros relacionados en las cuatro fases que se muestran en la figura 2.



Fase I: Soporte de fibra y de alumninio con fajita y bobina



Fase II: Soporte y bobina con anilla inferior



Fase III: Soporte y bobina con anilla superior



Fase IV: Soporte y bobina con anilla inferior e imán

Figura 2: Fases I, II, II y IV para el calibrado del modelo numérico

En la figura 3 se comparan los resultados experimentales con los numéricos para cada una de las cuatro fases. Como se puede apreciar, los resultados cuando el soporte es de aluminio son mejores que cuando son de fibra. Se parte de una temperatura inicial de 33ºC y se está suministrando una potencia eléctrica de 40 w.

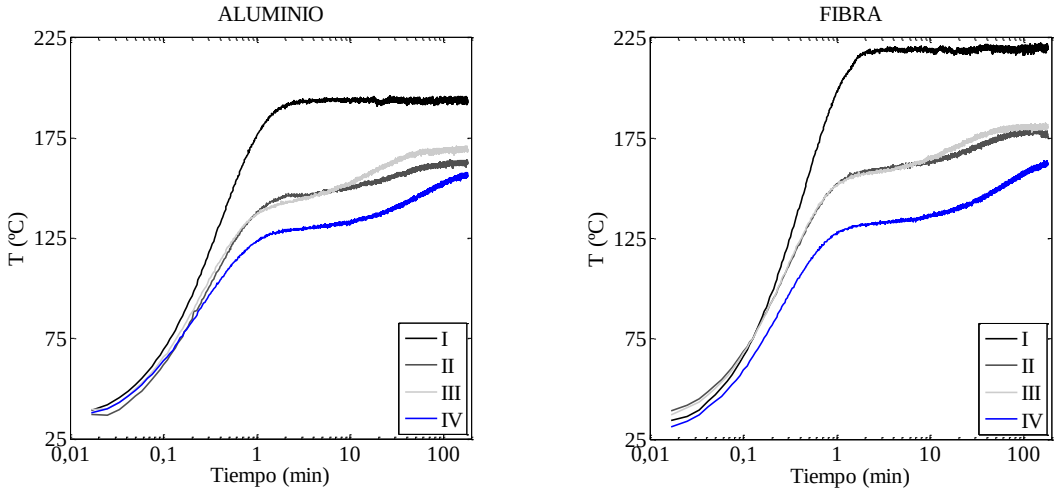



Figura 3: Dependencia de la temperatura de la bobina frente al tiempo cuando se está alimentando con 40 vatios y la temperatura inicial (ambiente) es de 33 ºC

.

Se comentarán a continuación algunos aspectos del modelo implementado para la fase IV.
En la figuras 4 se muestran los diferentes dominios del modelo diferenciados por colores: pieza polar superior e inferior, imán, aire. En la figura de la derecha se ha ampliado la zona de la bobina en la que se pueden distinguir las dos piezas polares, la bobina propiamente dicha, la fajita ( por donde no hay bobina ) y el cilindro que constituye el soporte que, en las experiencias llevadas a cabo ha sido de aluminio o de polímero.




Figura 4: Partes del modelo en elementos finitos. A la derecha se ha ampliado la zona enmarcada para visualizar la bobina, la fajita y el entrehierro con aire (color verde)

El modelo tiene 269543 elementos tipo PLANE78 y COMBIN40 para simular las Resistencias térmicas y 806853 nudos. Las características de referencia de los materiales utilizados son las siguientes:

Tabla 1: Características de los componentes.

| | Densidad Kg/m$^3$ | Conductividad térmica W/(m ºC) | Calor específico J/(Kg ºC) | Coeficiente de convección W/(m$^2$ ºC) |
|---|---|---|---|---|
| Cobre | 8900 | 390 | 390 | 32,5 |
| Polímero | 1020 | 0,2256 | 1386 | 2,0 |
| Aluminio | 2705 | 234 | 900 | 3,0 |
| Acero | 7870 | 49,8 | 448 | 3,0 |
| Ferrita | 4800 | 1,49 | 878 | 3,0 |
| Aire | 1 | 0,030 | 1000 | 1 |

Por lo que respecta a las resistencias térmicas, el modelo de la fase IV se ha lanzado con los siguientes valores: 2,686*10$^{-6}$ ºC/W (contactos soporte-bobinado y también soporte-fajita); 0,02 ºC*m$^2$/W (contactos imán-anilla superior e imán-núcleo central).

Se lanzaron diferentes simulaciones cambiando ligeramente los datos a estos datos de referencia. Las variables que más afectan son la conductividad térmica y el coeficiente de convección. Algunos de los resultados se muestran en la figura 5 (parte izquierda). Los resultados, en esta gráfica, se presentan en escala logarítmica (tiempo). En la parte derecha de la figura 5 se ha seleccionado la simulación que más se acerca a los resultados experimentales y se ha representado en escala lineal.

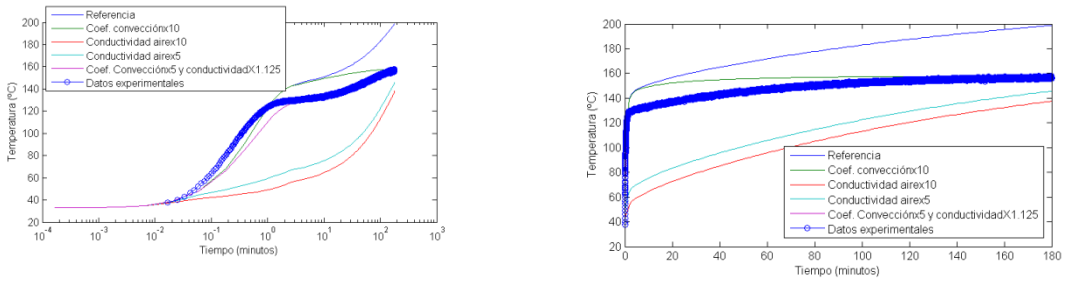



Figura 5: Izquierda. Comparativa de resultados experimentales frente a las simulaciones (escala logarítmica para el tiempo). Derecha: Comparativa de la simulación con datos experimentales (escala lineal en el eje del tiempo)

Los resultados mostrados en la figura 5 indican que se consigue un ajuste más que razonable por lo que los resultados podrían ser utilizados para predecir el efecto de pequeñas variaciones y/o para comparar modelos

## 3. APLICACIONES Y RESULTADOS

A partir de trabajo realizado ajustando el modelo en la fase IV, se han abordado los modelos completos. El primero de ellos corresponde a un driver con una sola bobina y el segundo a un altavoz de doble bobina. La geometría de ambos se muestra en la figura 6 (izquierda y derecha

respectivamente) en la que también se visualizan los dominios de los modelos implementados. Los resultados indican que la situación más ventajosa se produce en el primer caso. Los resultados se corresponden cualitativamente con los experimentales. Además, se ha implementado un modelo para predecir el efecto de colocar un cono de aluminio superpuesto al cilindro que conforma el soporte de la bobina, tal como se muestra en la figura 7. Como se puede apreciar, los resultados son positivos ya que la temperatura de la bobina disminuye.

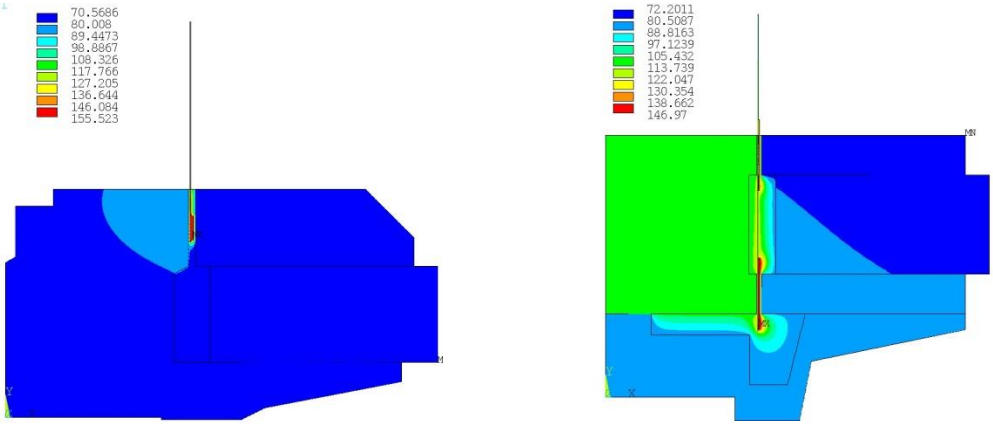



Figura 6: Modelos implementados aplicando el calibrado de la fase IV

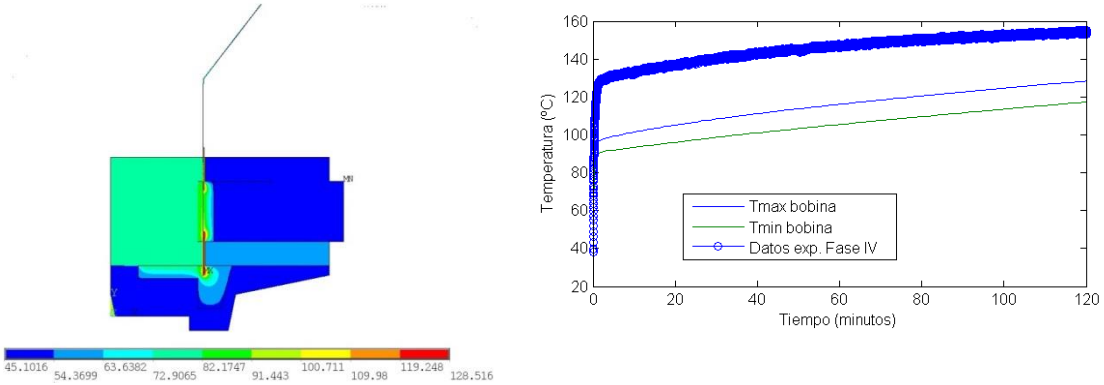



Figura 7: Izquierda: Resultados del modelo al instalar un cono difusor de aluminio en la parte superior del cilindro que constituye el soporte de la bobina. Derecha: Temperatura máxima y mínima de la bobina comparada con los datos experimentales de la fase IV

## 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología simplificada para el análisis del efecto que provocan pequeños cambios en la configuración del motor y del conjunto móvil de un altavoz de radiación directa en la temperatura del imán, que como es sabido tiene una repercusión directa en el rendimiento del transductor.

## REFERENCIAS

[1] Eargle, John. “Loudspeaker Handbook – Second Edition.” Kluwer Academic Publishers. New York, USA. 2003.

[2] Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers’, D. J. Button, J. Audio Eng. Soc., Vol 40 No 1/2, January/February 1992.

[3] Heat Transfer Mechanisms in Loudspeakers: Analysis, Measurement and Design’, C.A.Henricksen, J. Audio Eng. Sot., Vol 35 No 10, October 1987.

[4] Modelling of the Thermal Behaviour of High Power Loudspeakers’, Dr. Ing Gottfried Behler, a paper of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim Norway, June 1995

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

# UTILIZAÇÃO DE UM MODELO 3D ACA-BEM EM PROBLEMAS DE PROPAGAÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO

PACS:43.50.Lj, 43.28.Js

Paulo Amado Mendes[1]; Luís Godinho[1]; Pedro Gil Santos[1]; Jesus Carbajo[2]; Jaime Ramis-Soriano[2]

[1] ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
{ pamendes@dec.uc.pt, lgodinho@dec.uc.pt, uc2006107489@student.uc.pt }

[2] Departamento de Física, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España
{ jesus.carbajo@ua.es, jramis@ua.es }

## ABSTRACT

In the present work, the implementation of an efficient Boundary Element model is addressed to simulate the 3D exterior sound propagation in the presence of traffic noise mitigation structures or warning sounds generated by electric vehicles (EV). The use of adequate Green's functions and the use of the Adaptive Cross Approximation strategy allow to efficiently simulate complex problems, by taking into account the presence of totally reflecting plane surfaces and saving memory, with high levels of accuracy of the numerical results.

Some examples are presented to illustrate the capabilities of the proposed model to analyse the 3D sound propagation.

## RESUMO

No presente trabalho, analisa-se a implementação de um modelo de elementos fronteira eficiente para simular a propagação exterior 3D do som na presença de estruturas de redução de ruído de tráfego ou de sons de alerta gerados por veículos elétricos. A utilização de funções de Green adequadas e da estratégia designada por "Adaptive Cross Approximation" permite simular eficientemente problemas complexos, tendo em consideração a presença de superfícies planas totalmente refletoras e poupando recursos computacionais de memória com elevados níveis de precisão dos resultados numéricos.

Apresentam-se resultados sob a forma gráfica que permitem ilustrar as potencialidades do modelo numérico proposta para a análise a propagação 3D do som.

## INTRODUÇÃO

O carácter tridimensional (3D) de alguns fenómenos acústicos, designadamente da propagação (no exterior) de ondas sonoras na presença de determinados obstáculos ou heterogeneidades, tem sido responsável pela procura de ferramentas de simulação cada vez

mais eficientes. Um dos métodos numéricos que tem sido frequentemente adotado para a análise da propagação (bi- e tridimensional) do som num meio não confinado é o Método dos Elementos Fronteira (BEM) [1, 2], necessitando apenas da discretização da interface do sistema a modelar e verificando automaticamente as condições de propagação em campo infinito.

Outros exemplos incluem o uso do Método das Diferenças Finitas, o Método dos Elementos Finitos ou, mais recentemente, o uso de algumas técnicas que dispensam a discretização do domínio de propagação, tal como o Método das Soluções Fundamentais [3].

No âmbito do presente trabalho, propõe-se a utilização de uma técnica de aproximação adaptativa, descrita, por exemplo, em [4, 5], com o objetivo de dotar o BEM de maior eficiência, de modo a possibilitar a resolução, num período de tempo razoavelmente limitado, de problemas de propagação do ruído de tráfego cada vez mais complexos e abrangendo domínios cada vez mais extensos [6].

Deste modo, descreve-se seguidamente a formulação matemática do problema a analisar e apresenta-se a formulação do Método dos Elementos Fronteira usada, as funções de Green adotadas e a técnica implementada de aproximação por blocos das matrizes. A comparação entre resultados do modelo 3D ACA-BEM com os resultados de um modelo BEM convencional, para um caso de referência, permitiu verificar a correta implementação do modelo proposto. No final do trabalho, ilustram-se as potencialidades e a eficiência do modelo, na análise de dois problemas de propagação 3D do ruído de tráfego, na presença de medidas de mitigação ou de sistemas de alerta para veículos elétricos.

## FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

### Equação governante e soluções fundamentais

Habitualmente, assume-se que a propagação 3D do som, num meio fluido homogéneo, é descrita no domínio da frequência pela equação diferencial às derivadas parciais conhecida por equação de Helmholtz, representada por:

$$\nabla^2 p(\mathrm{x},\omega)+\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p(\mathrm{x},\omega)=0, \tag{1}$$

em que $c$ é a velocidade de propagação do som no meio acústico, $p(\mathrm{x},\omega)$ é a pressão do fluido num ponto $\mathrm{x}\equiv(x,y,z)$ do domínio, para uma frequência angular de excitação $\omega=2\pi f$, e $\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$, em problemas tridimensionais.

Quando aquele meio de propagação é excitado por uma fonte pontual harmónica, localizada em $\mathrm{x}_0\equiv(x_0,y_0,z_0)$, a pressão num ponto $\mathrm{x}\equiv(x,y,z)$, pode ser descrita pela solução fundamental do problema (ou função de Green) para a pressão, dada por:

$$G(\mathrm{x},\mathrm{x}_0)=\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}}{4\pi r}, \tag{2}$$

onde $r$ representa a distância $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}$, $k$ representa o número de onda $k=\frac{\omega}{c}$ e $\mathrm{i}=\sqrt{-1}$.

Por outro lado, a existência de superfícies planas totalmente refletoras (i.e. apresentando um coeficiente de reflexão unitário) pode ser tida em consideração de forma eficiente, recorrendo à conhecida técnica/estratégia das fontes-imagem. Deste modo, o efeito de uma fonte pontual,

na presença de determinada superfície plana refletora, pode ser contabilizado caso se considere uma fonte virtual adicional (fonte imagem), localizada em posição simétrica em relação à superfície refletora. Assim, à semelhança do que foi descrito por Godinho et al. [2], se aquela superfície se encontrar localizada em $z=0$, a correspondente função de Green virá definida por:

$$G_{half}\left(\mathrm{x},\mathrm{x}_0\right)=\frac{\mathrm{e}^{-ikr}}{4\pi r}+\frac{\mathrm{e}^{-ikr_1}}{4\pi r_1} \tag{3}$$

em que a distância $r_1$ é agora dada por $r_1=\sqrt{\left(x-x_0\right)^2+\left(y-y_0\right)^2+\left(z+z_0\right)^2}$.

De qualquer modo, seguindo a abordagem descrita naquele trabalho [2], é também possível considerar o caso de uma superfície parcialmente refletora. Neste caso, deve multiplicar-se o efeito da fonte virtual adicional por um coeficiente de reflexão genérico $R<1$, que se pode relacionar com o coeficiente de absorção do som, $\alpha$, através da expressão $R=\sqrt{1-\alpha}$. Assim, a função de Green para o caso de uma superfície plana parcialmente refletora virá:

$$G_{half}\left(\mathrm{x},\mathrm{x}_0\right)=\frac{\mathrm{e}^{-ikr}}{4\pi r}+R\frac{\mathrm{e}^{-ikr_1}}{4\pi r_1}. \tag{4}$$

**Formulação do Método dos Elementos Fronteira (BEM)**

A partir da aplicação do Teorema da Reciprocidade à equação (1), é possível deduzir a equação integral de fronteira clássica:

$$C\left(\mathrm{x}_0\right)p\left(\mathrm{x}_0\right)=-\mathrm{i}\rho\omega\int_{\Gamma}G\left(\mathrm{x},\mathrm{x}_0\right)v_n\left(\mathrm{x}\right)\mathrm{d}\Gamma-\int_{\Gamma}\frac{G\left(\mathrm{x},\mathrm{x}_0\right)}{\partial n}p\left(\mathrm{x}\right)\mathrm{d}\Gamma+p_{inc}\left(\mathrm{x}_\mathrm{s},\mathrm{x}_0\right), \tag{5}$$

onde $\Gamma$ representa a superfície da fronteira, $\rho$ é a massa volúmica do meio acústico e $p_{inc}\left(\mathrm{x}_\mathrm{s},\mathrm{x}_0\right)$ corresponde ao campo incidente, em termos da pressão gerada pela fonte real posicionada no ponto $\mathrm{x}_\mathrm{s}\equiv\left(x_s,y_s,z_s\right)$; $p\left(\mathrm{x}\right)$ e $v_n\left(\mathrm{x}\right)$ representam, respetivamente, a pressão no fluido e a componente segundo a normal da velocidade da partícula em $\mathrm{x}$. O coeficiente $C\left(\mathrm{x}_0\right)$ depende da geometria da fronteira no ponto de colocação $\mathrm{x}_0$, sendo igual a $1/2$, no caso de a fronteira $\Gamma$ ser suave.

Ao longo da fronteira, diferentes condições fronteira podem ser impostas, designadamente condições do tipo Dirichlet, quando o valor da pressão é conhecido ($p\left(\mathrm{x}\right)=\overline{p}\left(\mathrm{x}\right)$), condições do tipo Neumann, em que se prescreve o valor da velocidade segundo a normal ($v\left(\mathrm{x}\right)=\overline{v}\left(\mathrm{x}\right)$), ou condições do tipo Robin, quando é possível estabelecer uma relação entre a pressão e a velocidade ($p\left(\mathrm{x}\right)/v\left(\mathrm{x}\right)=\overline{Z}\left(\mathrm{x}\right)$), com $\overline{Z}\left(\mathrm{x}\right)$ a representar a impedância acústica da fronteira.

A resolução desta equação integral, no caso de uma superfície genérica, requer a discretização da fronteira em elementos e a definição de pontos nodais no seu interior (funções de interpolação constante, neste caso). Assim, depois de estabelecer as condições fronteira adequadas e aplicando sucessivamente a carga virtual em cada nó ao longo da fronteira, obtém-se um sistema de equações lineares, que relaciona valores nodais da pressão e da velocidade segundo a normal à fronteira, e cuja solução corresponde aos valores nodais da pressão e da velocidade normal em cada elemento fronteira. Posteriormente, por aplicação da equação integral de fronteira (5), é possível determinar o valor da pressão em qualquer ponto do meio de propagação.

**Técnica ACA - *Adaptive Cross Approximation***

Em problemas realistas tridimensionais com configurações geométricas genéricas, a aplicação do BEM apresenta dificuldades acrescidas, em termos de memória computacional (RAM)

necessária, devido ao completo preenchimento da matriz do sistema. Assim, a técnica de aproximação adaptativa em cruz (em inglês designada por Adaptive Cross Approximation - ACA) [4, 5] para matrizes densas é aqui sugerida de modo a melhorar a eficiência da formulação BEM, aumentando a sua rapidez de cálculo, mantendo a precisão e reduzindo significativamente as suas necessidades em recursos computacionais, como o tempo de CPU e a memória RAM mobilizada. A técnica ACA baseia-se na representação de matrizes hierárquicas (matrizes *H*), que podem ser entendidas como uma estrutura algébrica que reflete uma divisão geométrica da matriz em sub-blocos, que são classificados como sendo admissíveis ou não. Esta estrutura em blocos permite salientar que a obtenção das matrizes hierárquicas é facilmente paralelizável. Depois de concluir a formação de cada bloco, os blocos admissíveis terão de ser aproximados. A principal vantagem desta técnica é que, naquela aproximação, apenas é necessário o cálculo de um número reduzido de elementos originais dos blocos da matriz, mantendo-se um bom nível de aproximação. O bloco da matriz aproximado *A* pode escrever-se na forma:

$$A \approx S_k = UV^T \tag{6}$$

em que *U* e *V* são obtidos a partir de um número reduzido de linhas e colunas de *A*, com base na dimensão e na (elevada) distância entre grupos de pontos de colocação e de grupos de elementos fronteira.

De modo a tirar partido de todas as vantagens deste tipo de abordagem, torna-se necessário proceder à resolução do correspondente sistema de equações com recurso a um procedimento iterativo. Neste caso, o procedimento de resolução do sistema adotado é o GMRES (*Generalized Minimal Residual Method*), em conjunto com um pré-condicionador baseado nos blocos não admissíveis da matriz, para acelerar a convergência.

## VERIFICAÇÃO E DESEMPENHO DA FORMULAÇÃO PROPOSTA

Para ilustrar a correta implementação da formulação ACA-BEM proposta foi efetuada uma verificação dos resultados numéricos com base num modelo 3D simples. Assim, considerou-se um modelo composto por uma esfera rígida, de diâmetro unitário, localizada num meio fluido de propagação (com as propriedades do ar) e posicionada sobre um plano rígido. Este sistema é excitado por uma fonte pontual harmónica, apresentando-se, na Figura 1, os resultados em termos da pressão à superfície da esfera para uma frequência de 500Hz. Para comparação, ilustram-se os resultados obtidos com recurso a um modelo de elementos fronteira convencional (Figura 1a)) e com o modelo ACA-BEM proposto (Figura 1b)). É possível salientar a concordância entre os resultados obtidos pelos dois métodos, com as distribuições dos valores da pressão praticamente idênticas nas duas figuras.

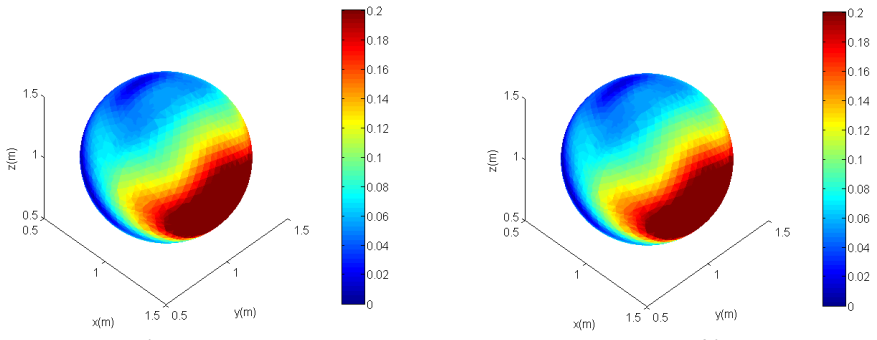
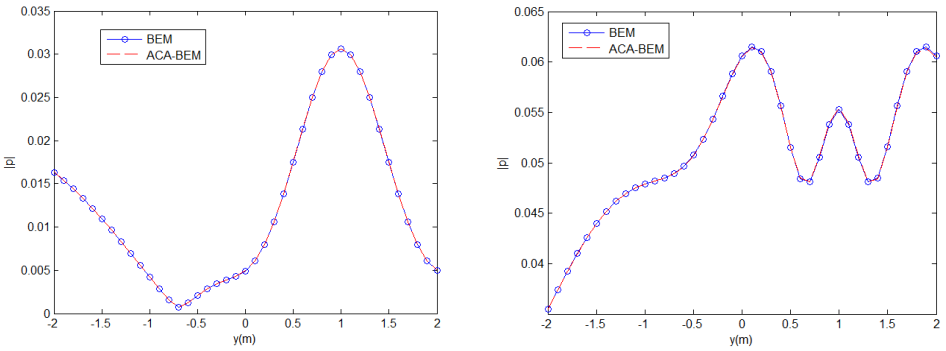



Figura 1: Verificação do modelo proposto – esfera sobre um plano rígido, comparação da pressão à superfície, para uma frequência de 500Hz: a) BEM convencional e b) ACA-BEM.

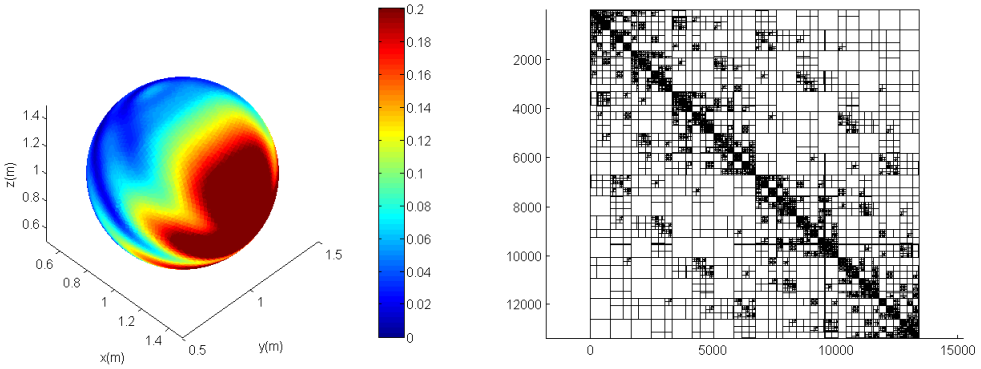
Utilizando o mesmo modelo com a esfera sobre um plano rígido, procedeu-se ao cálculo, para as frequências de 250Hz e 500Hz, do valor absoluto da pressão numa linha de receptores afastada do corpo rígido. Na Figura 2, apresentam-se os resultados calculados pelo método BEM convencional e pelo método ACA-BEM, sendo possível destacar, novamente, a coincidência de resultados para o conjunto de receptores selecionado.




a) b)

Figura 2: Verificação do modelo proposto – esfera sobre um plano rígido, comparação das respostas sobre linha de recetores com modelos BEM convencional e ACA-BEM, para frequências de: a) 250Hz e b) 500Hz.

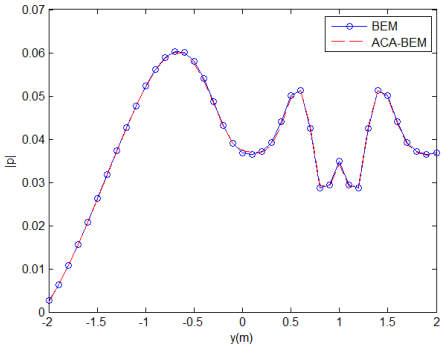
Ilustram-se, ainda, os resultados determinados para a frequência de 1000Hz, quando se adotou uma discretização bastante densa da superfície da esfera, em 13408 elementos fronteira. Assim, na Figura 3, pode observar-se a resposta do modelo em termos de pressão sobre a superfície da esfera (Figura 3a)) e, na Figura 3c), a comparação com os resultados do BEM convencional sobre a linha de receptores acima referida, que ilustra a boa precisão do método proposto. Na Figura 3b) é apresentada, como curiosidade, a representação matricial hierárquica no modelo ACA-BEM, com as zonas de interação mais forte entre os blocos da matriz assinalados a cor mais escura e, nos espaços assinalados a branco, as zonas com os blocos da matriz com menor interação e que permitem tirar partido da técnica ACA, reduzindo para 50% as necessidades de memória RAM em relação ao modelo BEM com a matriz completamente preenchida.




a)



b)




c)

Figura 3: Análise do desempenho do modelo proposto – esfera sobre um plano rígido, para uma frequência de 1000Hz: a) resposta do modelo ACA-BEM sobre a superfície da esfera discretizada em 13408 elementos fronteira, b) representação matricial hierárquica no modelo ACA-BEM e c) comparação das respostas entre modelos BEM convencional e ACA-BEM.

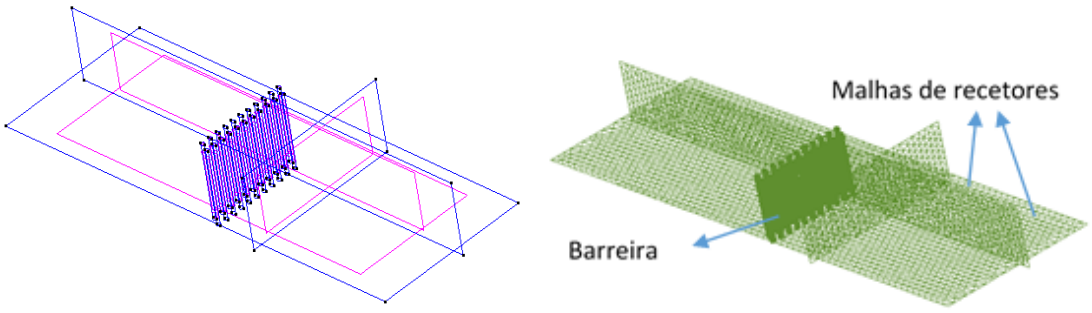
## EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

As potencialidades do modelo 3D ACA-BEM são agora ilustradas, de forma sintética, através de dois conjuntos de resultados. Num primeiro caso, a metodologia foi aplicada na modelação da propagação do ruído de tráfego na presença de diferentes tipos de medidas de mitigação; e, posteriormente, apresentam-se os resultados da aplicação do modelo ao caso de um veículo elétrico e da modelação da propagação do ruído emitido pelo dispositivo de alerta.

### Mitigação do Ruído de Tráfego

Considerou-se, num primeiro caso ilustrativo, um conjunto de medidas de redução do ruído de tráfego à escala real, tendo-se optado por analisar uma configuração de barreira acústica tradicional e três configurações inovadoras de barreiras acústicas, baseadas em elementos discretos verticais, dispostos na forma de barreira descontínua. Neste caso, a atenuação sonora conferida por este tipo de estruturas está relacionada com o seu comportamento enquanto "cristal sónico", apresentando-se resultados para conjuntos de 3 filas de 11 elementos dispersores, com a incorporação de elementos cilíndricos, de cilindros seccionados verticalmente a meio e de elementos paralelepipédicos, dispostos numa configuração de malhar triangular.

A utilização de uma ferramenta de simulação numérica baseada no método 3D ACA-BEM descrito anteriormente permite analisar de forma eficiente e com tempos de cálculo razoáveisum conjunto de configurações previamente definidas. A definição genérica do modelo 3D, com a barreira (tradicional ou com os elementos dispersores), com um plano horizontal refletor que representa o pavimento rígido e com as malhas de receptores para cálculo e análise posterior de resultados, é ilustrada esquematicamente na Figura 4.

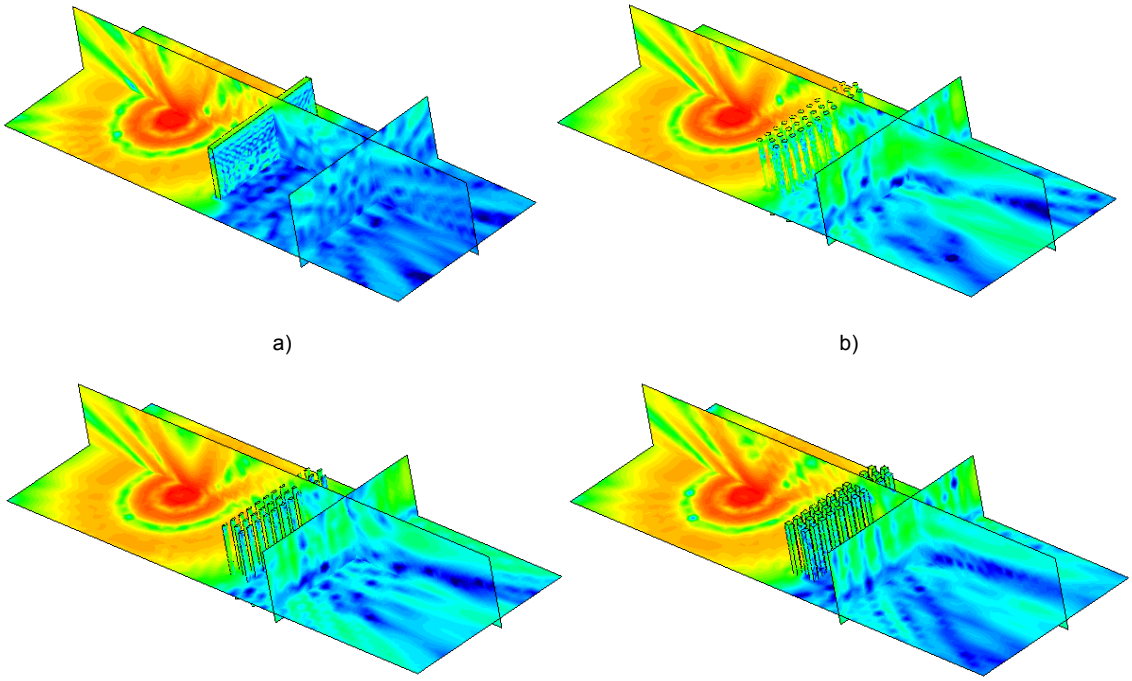



a) b)

Figura 4: Definição esquemática do modelo genérico 3D com medidas de redução de tráfego do tipo barreira tradicional ou com elementos dispersores verticais.

Este sistema físico foi excitado por um fonte pontual posicionada acima do pavimento rígido e atuando a uma certa distância da barreira acústica, encontrando-se centrada com esta estrutura. Os resultados numéricos foram obtidos para um elevado número de receptores, localizados sobre o pavimento, na superfície da barreira ou dos dispersores, e em dois planos verticais ortogonais. Na Figura 5, ilustram-se os resultados obtidos, em termos de níveis de pressão sonora, para as 4 configurações analisadas e para uma frequência de excitação da fonte de 1000Hz.

O método 3D ACA-BEM implementado revelou-se particularmente eficiente na resolução destes problemas, tendo permitido a análise de problemas computacionalmente muito exigentes, com discrerizações desde 15192 elementos, para o caso da barreira tradicional com 5m de comprimento, até ao modelo mais pesado com 39336 elementos, no caso da barreira com 3 filas de cilindros dispersores. De facto, para problemas com estas dimensões, saliente-se que a modelação computacional com o BEM apenas se tornou possível fazendo uso de uma técnica de tratamento de matrizes adequada como a técnica ACA. Na Figura 5 pode observar-se a atenuação dos níveis sonoros conferida pelas estruturas de mitigação, estando bem patente o caráter 3D dos resultados obtidos.



a) b)

c) d)

Figura 5: Comportamento 3D, para diferentes medidas de mitigação, em termos de pressão sonora para uma frequência de 1000Hz: a) barreira tradicional, b) barreira com 3 filas de cilindros circulares, c) barreira com 3 filas de meios cilindros, e d) barreira com 3 filas de paralelepípedos.

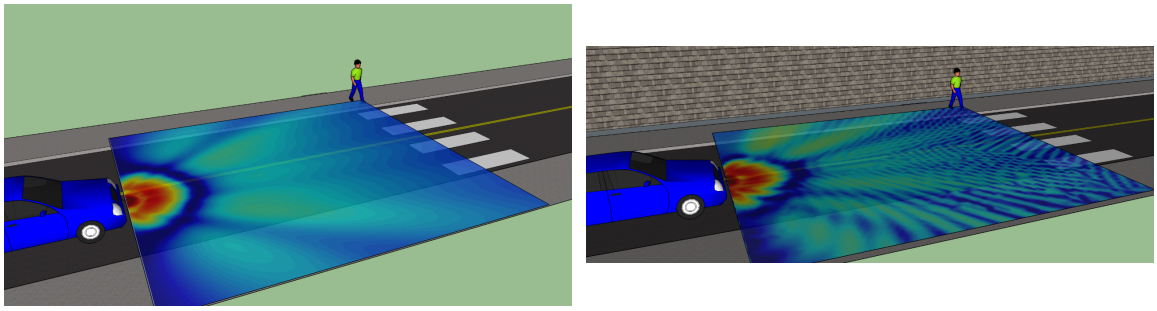
**Ruído de alerta de veículos elétricos**

No segundo exemplo de aplicação selecionado para ilustrar as potencialidades da metodologia 3D ACA-BEM proposta são analisados os níveis de pressão sonora (SPL) resultantes da propagação do ruído de alerta de um veículo elétrico. Considerou-se a modelação daquela fonte sonora como um altifalante incorporado na zona frontal de um veículo 3D, que foi discretizada através de 11812 elementos. Na Figura 6, ilustram-se os resultados numéricos obtidos, para uma frequência de cálculo de 1000Hz, em duas condições de propagação distintas: no caso da configuração de uma rua aberta (Figura 6 a)) e para o caso da configuração de uma rua com uma parede lateral totalmente refletora, que poderá representar um edifício alto paralelo à rua (Figura 6 b)).

De novo, deverá referir-se que o contributo da técnica ACA implementada foi decisivo para a obtenção destes resultados numéricos de forma eficiente. As figuras ilustram, para uma dada frequência (1000Hz) a resposta do sistema, correspondendo à influência do campo incidente emitido pelo dispositivo de alerta, mas incorporando ainda a influência das reflexões provenientes do pavimento do rígido e/ou da parede rígida paralela à rua, que muito contribuem para um padrão da resposta bastante complexo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentado um modelo 3D baseado no método dos elementos fronteira (3D ACA-BEM), para a simulação da propagação exterior do som. Por forma a tornar a metodologia eficiente, foram incorporadas funções de Green apropriadas, para ter em consideração a presença de superfícies planas refletoras, assim como se implementou uma técnica para análise de matrizes densas, que permite aumentar a rapidez de cálculo e reduzir a memória necessária em problemas realistas de grande dimensão. A estratégia de resolução foi descrita, tendo-se apresentado a sua verificação através da comparação com resultados de outros métodos numéricos consolidados. As potencialidades do modelo proposto foram ilustradas em dois exemplos de aplicação, cuja resolução eficiente muito beneficiou das técnicas implementadas, tendo em consideração a dimensão dos sistemas físicos discretizados.



a) b)

Figura 6: Aplicação do modelo 3D ACA-BEM proposto à propagação de ruídos de alerta de veículos elétricos; níveis de pressão sonora calculados para uma frequência de 1000Hz: a) configuração de rua aberta, e b) configuração de rua com parede lateral.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com financiamento da “Dirección General de Tráfico, Ministerio del Interior de España”, através do projeto com a referência SPIP2014-01406 (“Estudio y adecuación de los sonidos de advertencia en vehículos eléctricos”) e com financiamento do FEDER, através do COMPETE – Programa Operacional Fatores de Competitividade e de fundos nacionais da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do projeto “SCLog”, com a referência PTDC/ECM-COM/1438/2012.

## REFERÊNCIAS

[1] Wu, T. (ed.) [2000] Boundary Element in Acoustics (WIT Press, Southampton, UK)..

[2] Godinho, L., Costa, E.G.A., Santiago, J., Pereira, A., Amado-Mendes, P., 3D analysis of the sound reduction provided by protective surfaces around a noise source. International Journal of Acoustics and Vibration, 19 (2), 78-88, 2014.

[3] Godinho, L., Costa, E.G.A., Pereira, A.,Santiago, J., Some observations on the behavior of the Method of Fundamental Solutions in 3D acoustic problems. International Journal of Computational Methods, 9 (4), 2012.

[4] Rjasanow, S., Adaptive Cross Approximation of Dense Matrices. IABEM 2002, International Association for Boundary Element Methods, UT Austin, TX, USA, May 28-30, 2002.

[5] Brancati, A., Aliabadi, M. H., Benedetti, I., Rapid Acoustic Boundary Element Method for Solution of 3D Problems using Hierarchical Adaptive Cross Approximation GMRES Approach. Advances in Boundary Element Techniques X, Eds: E.J. Sapountzakis, M.H. Aliabadi, 37-42, 2009.

[6] Godinho, L., Amado-Mendes, P., Santos, P. G., Cordeiro, M. An efficient and accurate numerical model for the 3d analysis of sonic crystals. 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, 2015.

# Nuevo módulo ***NOISELAB REPORT*** para Acústica Ambiental y Aislamiento Acústico

## *Continuous Innovation*




## Integración total de ficheros Svantek en Noiselab




*Svantek & Noiselab alliance*

www.noiselab.net

SVANTEK

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SISTEMA DE AISLAMIENTO INTERCAMBIALE PARA BASE DE EDIFICIOS

PACS: 43.40 Tm

Vanstraelen, Michael; Almeida Pinto, Paulo
CDM NV
Reutenbeek 9-11
Overijse. Bélgica
+322 686 15 60
+322 686 35 52
E-mail: paulo.pinto@cdmportugal.pt
WEB: www.cdm.eu

## ABSTRACT

There is an increasing demand for Building Base Isolation (BBI). Buildings are being built closer to railways, tramways and metro lines since only the more difficult areas in cities are still at disposal for new constructions, while at the same time higher comfort levels - with respect to noise and vibrations - need to be met for people living and/or working in these buildings. When a building base isolation system is installed at the foundations of a new building, it is recommended to have access to it in order to monitor its well-functioning over time, and to be able to replace the isolators when necessary (e.g. in case of a fire, explosion, flooding, overloading, etc.). Up to now, replacement was only possible through the use of large pre-compressed steel boxes containing springs or rubbers. However, this paper and related presentation brings an alternative method for replacing "Very-High-Stress" rubber bearings (VHS) using the "frozen bearing technology" (FBT), which was recently developed by CDM. This technology has already been applied meanwhile at some occasions, like in a new building complex in Nijmegen (NL), showing its functionality.

## RESUMEN

Hay una demanda creciente de sistemas de aislamiento (basal) de edificios (BBI). Actualmente, en cada vez más proyectos, los edificios se construyen cerca de ferrocarriles y líneas de metro, ya que sólo las áreas más difíciles están aún disponibles para la construcción, mientras los niveles de confort acústico a cumplir para las personas que viven o trabajan en estos edificios son cada vez más exigentes. Otro requisito a tener en cuenta es el acceso a los dispositivos de aislamiento, para controlar su buen funcionamiento o para reemplazarlos. Hasta ahora sólo era posible el reemplazo por medio de sistemas pre-comprimidos (ya sea con muelles o tacos de caucho) en cajas de acero. Sin embargo, este trabajo aporta un método alternativo para la sustitución de los apoyos de caucho de muy alta resistencia (VHS-Very High Stress) utilizando la tecnología de soportes congelados (FBT- Frozen Bearing Technology), desarrollada recientemente por la empresa CDM.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de sistemas de Aislamiento Basal de Edificios - BBI ("*Building Base Isolation*"), está relacionada con el requisito de una mayor comodidad acústica para las personas que los ocupan, en relación al ruido y vibraciones generadas, por ejemplo, por la circulación ferroviaria en las cercanías de dichos edificios. En estos casos, las cimentaciones del edificio se *cortan* (desolidarizando la infraestructura de la superestructura, habitualmente en un plano horizontal) para la instalación de los sistemas BBI, normalmente con una frecuencia de resonancia próxima a 10 Hz: el ruido y vibraciones de ferrocarriles generan energía principalmente entre 50 y 100 Hz, por lo que el filtro a 10Hz es suficiente para disminuir el ruido re-irradiado y las vibraciones en el interior de las edificaciones hasta un nivel aceptable de comodidad ($f_{exc}$ / $f_{res}$ = β> 5)

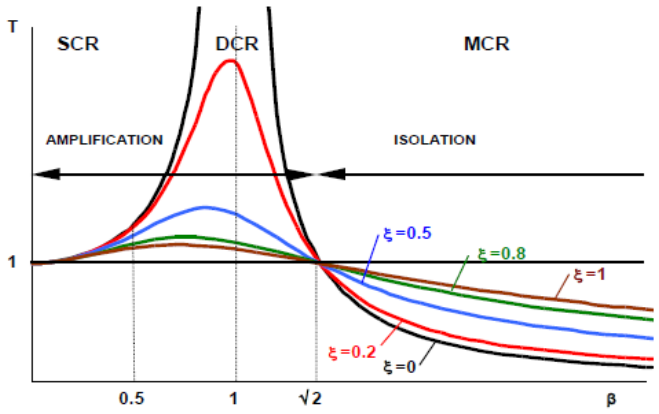



Figura 1. La transmisibilidad (T): gráfico para un sistema masa-muelle-amortiguador

La frecuencia de resonancia de 10 Hz puede ser alcanzada mediante apoyos de caucho (apoyos de muelles sólo se utilizan para situaciones muy críticas, es decir, cuando se requiere una fr<5 Hz).

Se recomienda tener acceso a todos los elementos de aislamiento de un sistema BBI para monitorear su buen funcionamiento con el tiempo, pero más en particular, permitir también reemplazar elementos dañados (p.ej. en caso de incendio, explosión, sobrecarga, inundación, sismo, etc.). Hasta ahora, este reemplazo sólo era posible mediante la aplicación de grandes cajas en acero con apoyos pre-comprimidos de caucho o de muelles…

## SISTEMAS BBI INTERCAMBIALES A TRAVÉS DE LA TECNOLOGÍA FBT

Por explicarlo resumidamente, la tecnología de apoyos congelados FBT ("Frozen Bearings Technology") permite que un apoyo de caucho se mantenga en un estado pre-comprimido (operación efectuada en el laboratorio o en fábrica), manteniendo su temperatura a -79 °C, muy por debajo de la temperatura de transición vítrea $T_g$. Este apoyo pre-comprimido puede ser transportado a la obra en una nevera portátil y se introduce en el “corte” que hacemos en la estructura de hormigón. Una vez colocado, las cargas que soporta el apoyo van aumentando a medida que su temperatura se va igualando con la temperatura ambiente y el

apoyo va aumentando de forma gradual su volumen, hasta llegar a ser plenamente operativo (capacidad de carga total), cuando su temperatura se iguala con la del ambiente y recupera su volumen inicial.

## PRUEBAS DE LABORATORIO

Se han llevado a cabo en laboratorio varias campañas de pruebas de los materiales resilientes para aplicación en el sistema BBI, con el objetivo de validar la tecnología FBT: pruebas estáticas y dinámicas de rigidez, pruebas de resistencia a la tracción, pruebas de recuperación de espesor tras descarga, etc. para comparar las características de los materiales antes y después de la pre-compresión y congelación a muy bajas temperaturas. Prácticamente no fueran registradas diferencias en los valores medidos de las características, lo que permite validar el buen funcionamiento de la tecnología propuesta.

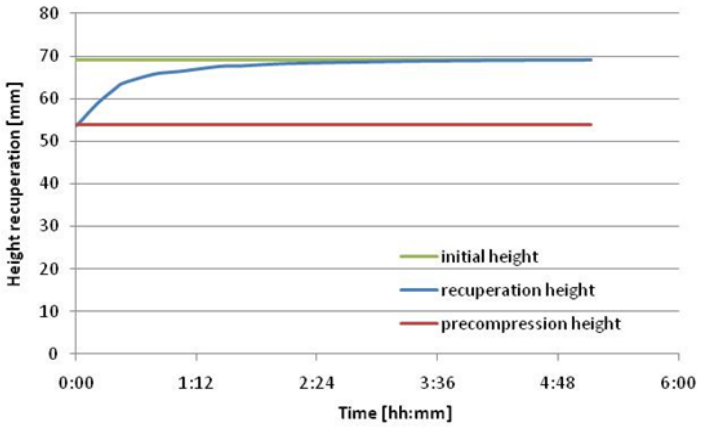



Figura 2. Test de recuperación de espesor tras descarga para el material CDM-82

## PROYECTO “POPPODIUM DOORNROOSJE – TALIA” EN NIJMEGEN (NL)

Este complejo está situado cerca de la estación central de tren de Nijmegen (Holanda) y consta de tres partes: un edificio alto ("Talia") con 15 niveles, que es residencial, una gran sala polivalente para grandes eventos culturales (1100p), y también una sala polivalente más pequeña (400P). Ambas las salas se conocen como "Doornroosje".




Figura 3. Vista del complejo

El sistema BBI elegido para este complejo fue del tipo CDM-VHS ("*Very High Stress*"), es decir, apoyos individuales constituidos por 4 capas de caucho de alta tensión de trabajo con 20 mm de espesor cada una, todas separadas por placas en acero galvanizado de 5 mm de espesor, con el objetivo de obtener una frecuencia de resonancia de aprox. 10Hz bajo la carga acústica ADL ("Acoustic Dead Load") de aproximadamente 12 N / mm² = 12MPa.



Figura 4. Apoyo CDM-VHS con 4 capas de caucho

Para el edificio residencial más alto, se han instalado los apoyos CDM-VHS en las cabezas de las columnas, dejando una parte central abierta para tener la posibilidad de introducir un dispositivo de elevación hidráulica para bloquear la deflexión (asiento) del edificio en caso de necesidad de reemplazar uno o más apoyos (por ejemplo, en caso de incendio, explosión, inundación, sobrecarga, sismo, etc.). Además, todos los elementos CDM-VHS (también para las 2 salas polivalentes) se han instalado por encima de un conjunto de 3 capas pegadas en material de cemento mezclado con gránulos de madera de alta densidad, de 18mm de espesor cada una.

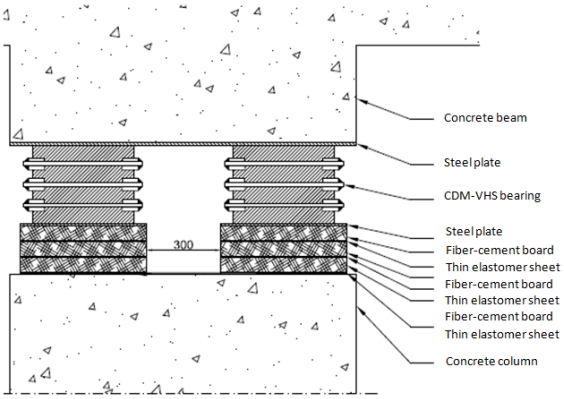



Figura 5. Sección esquemática del sistema BBI para el edificio residencial ("Talia")

En situación de necesidad de reemplazo de uno o más elementos del sistema CDM-VHS, el bloque de las capas de fibrocemento se perfora de lado sin dañar el hormigón estructural (después, por supuesto, de tener bloqueada estructuralmente esta zona del edificio para prevenir cualquier asiento diferencial cuando se quita uno o más apoyos a reemplazar). Este bloqueo se puede hacer mediante el uso de puntales de acero instalados de lado (en las salas) o gatos hidráulicos (procedimiento usado en el edificio alto "Talia").

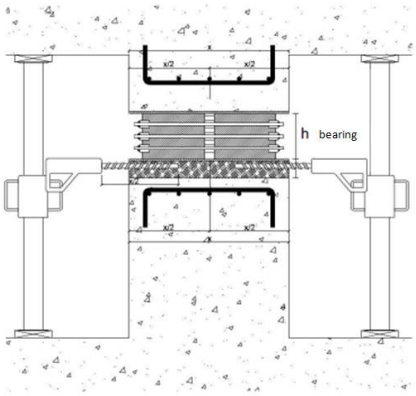



Figura 6. La perforación del bloque de base de los apoyos después de instalar los montantes para bloquear la deflexión del edificio

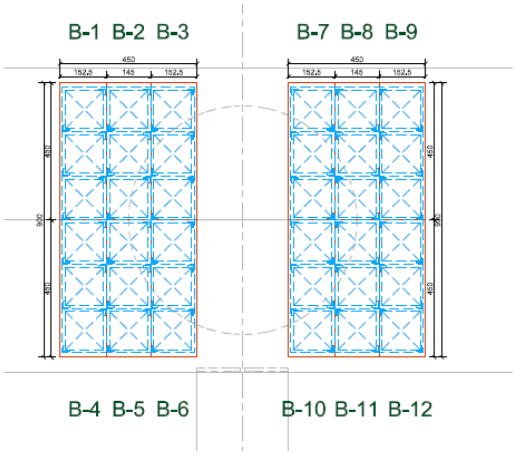



Figura 7. Plano de distribución de una de las columnas del edificio alto, mostrando los apoyos individuales CDM-VHS

El elemento aislante existente puede ser sacado y reemplazado por un nuevo elemento, que debe estar en un estado de compresión previa, realizada a través de la tecnología de apoyos congelados FBT ("*Frozen Bearings Technology*", desarrollada por CDM en 2009). A continuación, los puntales de bloqueo (o gatos) pueden ser quitados. Esta técnica fue aplicada con éxito al final de la fase de construcción de este edificio, con la necesidad de trasladar algunos apoyos CDM-VHS por razones puramente prácticas.



Figura 8. Foto de los nuevos apoyos CDM-VHS congelados

## SISTEMA BBI PARA EDIFICIOS EXISTENTES (REHABILITACIÓN)

La tecnología de apoyos congelados FBT también podría ser aplicada para introducir el sistema BBI bajo edificios existentes, como por ejemplo en edificios a rehabilitar, sometidos a vibraciones excesivas. Sin embargo, esto sólo es posible en caso de estructuras simples basadas sobre todo en columnas, con un número minimizado de muros de carga (por ejemplo los muros del núcleo de la estructura). En este caso se podría tratar una columna tras otra hasta que se trata todo el edificio. En un proceso de este tipo, en primer lugar es necesario bloquear la columna con montantes para soportar la carga por lo que la columna se puede cortar por completo y sin riesgo de inestabilidad. El corte debe hacerse suficientemente amplio para la instalación de los apoyos VHS pre-comprimidos (con recurso a la tecnología de congelación FBT), que soportará la carga tan pronto como se han calentado hasta la temperatura ambiente. Los montantes se pueden quitar y hacer la misma acción en la siguiente columna (o pared).

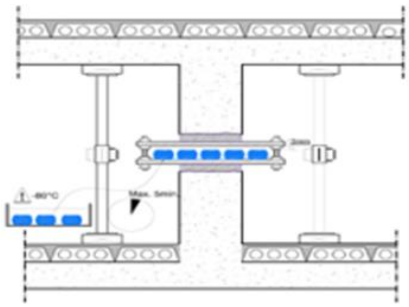


Figura 9. Vista en sección de la columna cortada

La tecnología de congelación FBT permite introducir el sistema BBI en los edificios existentes sin ninguna deflexión (asiento) adicional de la estructura, gracias al método único de pre-compresión desarrollado por CDM.

## CONCLUSIONES

Este artículo presenta una tecnología especifica que permite remplazar los apoyos estructurales en bases de edificios (sistema BBI), en particular los apoyos de caucho de elevada tensión CDM-VHS de una forma directa, simple y rápida, haciendo uso de la Tecnología de Apoyos Congelados FBT ("*Frozen Bearing Technology*"). Esto significa que el caucho se congela en un estado pre-comprimido a una temperatura de -79 ° C, muy por debajo de la temperatura de transición vítrea $T_g$.

Esta tecnología podría ser utilizada también para instalar los sistemas de apoyos resilientes estructurales BBI en edificios existentes, en proyectos de rehabilitación, con el objetivo de aislar el edificio de las vibraciones generadas en las cercanías por ejemplo en vías de tren o de metro y garantizar las perfectas condiciones de comodidad acústica à las personas.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# VALIDACIÓN DE MODELOS FEM DE TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES EN BARRAS EN L

PACS: 43.40.Cw

Magdaleno, Jesús[1]; Enrique Segovia[2], Ramis, Jaime[2]; Martín Bravo, Mª Ángeles[1]
[1]Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
C/ Francisco Mendizábal nº 1
47014 Valladolid
Tel. 34 983 423 525
magdal@uva.es
[2]Departamento de Física, Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig
03080, San Vicente del Raspeig, España
jramis@ua.es

## ABSTRACT

The finite element method (FEM) is increasingly applied in vibroacoustic. The validation of these models is important to justify its reliability and accuracy, so efforts should be made to document it properly. This work summarizes an experience of model validation, about vibration transmission through L-junction of beams. The flow of energy is analyzed by mean of the velocity level difference. The validation is performed by comparing the results with those obtained experimentally, studying convergence and using 2D and 3D models.

## RESUMEN

La simulación con elementos finitos (FEM) es una metodología cada vez más empleada en vibroacústica. La validación de estos modelos es importante para justificar su fiabilidad y precisión, por lo que conviene dedicar esfuerzos para documentar este proceso adecuadamente. Este trabajo recoge una experiencia de validación de modelos de transmisión de vibraciones en barras unidas en L, analizando el flujo energía mediante la diferencias de nivel de velocidad. La validación se realiza comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente, estudiando la convergencia y realizando modelos 2D y 3D.

## 1. INTRODUCCIÓN

La simulación con elementos finitos (FEM, Finite Element Method) es una metodología cada vez más empleada en vibroacústica, consiguiendo aproximaciones al comportamiento real de las soluciones de diseño adoptadas que son más fiables que las obtenidas por otros métodos de cálculo. Entre las principales ventajas del FEM puede destacarse que son necesarios menos ensayos experimentales. La validación de los modelos FEM es importante para justificar su fiabilidad y precisión, por lo que conviene dedicar esfuerzos para documentar este proceso adecuadamente. Este trabajo recoge una experiencia de validación de modelos de transmisión de vibraciones en barras unidas en L, analizando el flujo energía mediante la diferencias de nivel de velocidad. La validación se realiza comparando los resultados de los modelos FEM con los obtenidos experimentalmente, estudiando la convergencia y realizando modelos con elementos 2D y 3D.

La transmisión vibroacústica en uniones ha sido estudiada por muchos autores a partir de las aportaciones de Cremer en 1948 y de Cremer, Heckl y Ungar en 1973 y 1988 [1]. Un método basado en una aproximación modal es propuesto por Guyader, Boisson y otros [2], aunque reconocen que sería necesario calcular unos 800 modos propios para modelos de estructuras de edificación relativamente simples. Para solventar este problema proponen un cálculo analítico de dichos modos.

El FEM es usado por Simmons [3] para estudiar la transmisión de energía entre placas unidas en L y H, con frecuencias en el rango de 10 a 2000 Hz y excitación mediante una fuerza puntual. Los resultados de transmisión de energía son similares a los obtenidos por métodos analíticos y experimentales. El promediado espacial y en bandas de frecuencia parece suficientemente preciso para estimar la energía vibratoria en las placas. Para calcular la energía cinética utiliza los resultados de desplazamientos en varios puntos. También Mace y Shorter [4] utilizan el FEM para analizar el flujo de energía, incluyendo el postprocesado de resultados.

La verificación y validación es importante para justificar la fiabilidad y precisión de los cálculos realizados con modelos FEM [5]. También es necesaria en los modelos analíticos, puesto que la materialización de estos modelos en rutinas de cálculo en ordenadores puede dar lugar a diferentes resultados, ya sea por las características de dichas rutinas o por errores en su programación. La verificación de estas rutinas es difícil a partir de las gráficas publicadas en revistas, por lo que los grupos de investigación pueden intercambiar datos para verificar sus modelos e incluso establecer referencias formales para la verificación y validación de los modelos, como la descrita en [6]. Esta publicación incluye resultados de pérdida de transmisión, orientados al uso del SEA, para varios tipos de uniones de placas semi-infinitas, isótropas, delgadas y planas que soportan ondas de flexión, longitudinales y transversales en el plano.

La transmisión de potencia vibratoria a través de la unión entre elementos estructurales puede valorarse a través del nivel de velocidad y la diferencia de nivel de velocidad. Estos parámetros pueden determinarse tomando como referencia lo indicado en la norma EN ISO 10848-1:2007 [7].Para excitación estacionaria, estructural o aérea, el promedio espacial del nivel de velocidad se calcula con la Ec. 1, donde $v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2$ son las velocidades eficaces (cuadráticas medias) en n posiciones diferentes sobre el elemento, en m/s.

$$L_v = 10 \cdot log \frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}{n \cdot v_0^2} \quad dB \qquad \text{Ec. 1}$$

A partir de $L_{\mathrm{v}}$ se determina la diferencia de niveles de velocidad $D_{\mathrm{v,ij}}$ con la Ec. 2.

$$D_{v,ij} = L_{v,i} - L_{v,j} \qquad \text{Ec. 2}$$

## 2. DEFINICIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

Se estudiarán dos casos con barras unidas perpendicularmente. La primera unión está formada por barras de sección nominal 82 mm × 60 mm y se denominará LG (L gruesa) (Figura 1a). La segunda unión está formada por una barra de sección 80 mm × 59 mm y otra barra de sección 80 mm × 29 mm (Figura 1b). Se denominará LF (L fina). La barra excitada se identificara con la letra “u” y será la barra horizontal inferior de las imágenes. La barra no excitada se identificará con la letra “d” y será la barra vertical de las imágenes. El programa utilizado ha sido I-DEAS™.

El material utilizado es un tipo de piedra arenisca, denominado piedra Bateig. Las propiedades físicas nominales son semejantes a las del hormigón [8] [9] [10]. Algunas de las propiedades han sido ajustadas para mejorar los resultados de los análisis FEM, durante la calibración del modelo. Para ello se han estudiado modificaciones en el módulo de Young y en la densidad. En

los modelos, el material se denominará Bateig, añadiendo una codificación según las propiedades utilizadas. Un resumen de las denominaciones y propiedades empleadas puede verse en la Tabla 1.

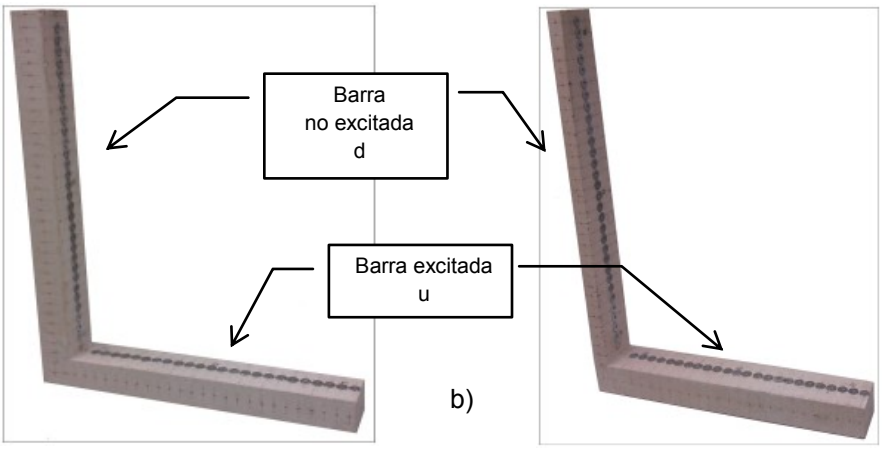
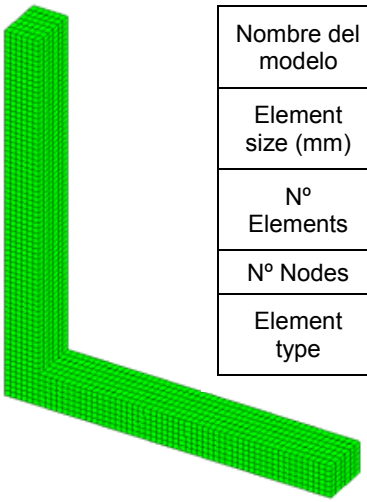



Figura 1: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

Tabla 1: Resumen de los diferentes datos de piedra Bateig utilizados.

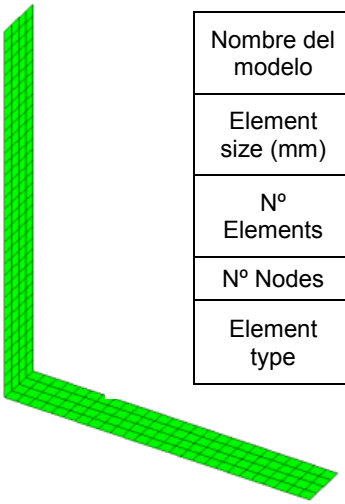
| | Modulo de Young (E) GPa | Coef. de Poisson (ν) | Densidad (ρ) Kg/m$^3$ | Coeficiente de amortiguamiento estructural |
|---|---|---|---|---|
| Bateig32 | 32 | 0,23 | 2315 | 0,01 |
| Bateig27 | 27 | 0,23 | 2315 | 0,01 |
| Bateig25 | 25 | 0,23 | 2315 | 0,01 |
| Bateig25_02 | 25 | 0,23 | 2400 | 0,01 |
| Bateig25_03 | 25 | 0,23 | 2315 | 0 |

Las especificaciones de las mallas utilizadas se resumen en la Tabla 2 para las uniones LG y en la Tabla 3 para las uniones LF. Unos ejemplos se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3.



| Nombre del modelo | LG3D02 |
|---|---|
| Element size (mm) | 10 |
| Nº Elements | 4320 |
| Nº Nodes | 21973 |
| Element type | Solid parabolic brick |

Figura 2: Malla del modelo LG3D02.



| Nombre del modelo | LG2D02 |
|---|---|
| Element size (mm) | 20 |
| Nº Elements | 236 |
| Nº Nodes | 835 |
| Element type | Thin shell parabolic quadrilateral |

Figura 3: Malla del modelo LG2D02.

Tabla 2: Resumen de las mallas utilizadas en las uniones LG.

| Nombre del modelo | Element size (mm) | Nº Elements | Nº Nodes | Element type |
|---|---|---|---|---|
| LG3D02 | 10 | 4320 | 21973 | Solid parabolic brick |
| LG3D03 | 5 | 19456 | 91585 | Solid parabolic brick |
| LG3D04 | 16 | 1152 | 6545 | Solid parabolic brick |
| LG3D05 | 25 | 784 | 4475 | Solid parabolic brick |
| LG2D02 | 20 | 236 | 835 | Thin shell parabolic quadrilateral |
| LG2D03 | 10 | 960 | 3137 | Thin shell parabolic quadrilateral |

Tabla 3: Resumen de las mallas utilizadas en las uniones LF.

| Nombre del modelo | Element size (mm) | Nº Elements | Nº Nodes | Element type |
|---|---|---|---|---|
| LF3D02 | 10 | 3060 | 16243 | Solid parabolic brick |
| LF3D03 | 5 | 12800 | 62257 | Solid parabolic brick |
| LF2D02 | 20 | 240 | 849 | Thin shell parabolic quadrilateral |
| LF2D03 | 10 | 952 | 3111 | Thin shell parabolic quadrilateral |

Las medidas experimentales se han realizado situando la muestra sobre un material que permite los movimientos de la superficie de apoyo, por lo que se ha estimado como más apropiado suponer en los cálculos un modelo de sólido libre, sin ninguna restricción de movimiento.

En cuanto a la excitación, en los modelos FEM se utiliza una carga de impacto, estudiando la respuesta para dos posiciones, denominadas F1 y F2. Se simula un impacto perpendicular a la superficie con un objeto externo con las características necesarias para que la respuesta tenga una amplitud semejante a la obtenida en los experimentos. En las medidas experimentales se ha utilizado la excitación producida por un actuador de tipo electrodinámico, como los que se utilizan en Altavoces de Modos Distribuidos (DML). La señal de entrada es una secuencia de máxima longitud (Maximun Length Sequence, MLS) [10].

## 3. VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

Los diferentes casos se identificarán según se indica en la Figura 4. Para facilitar la lectura y no duplicar la información, con denominaciones largas, se podrá omitir alguna de las partes. Por ejemplo, cuando no sea necesaria la identificación de la excitación, el material y la barra en la que se toman las medidas, o estén identificados por el contexto, la denominación puede ser LG2D02.

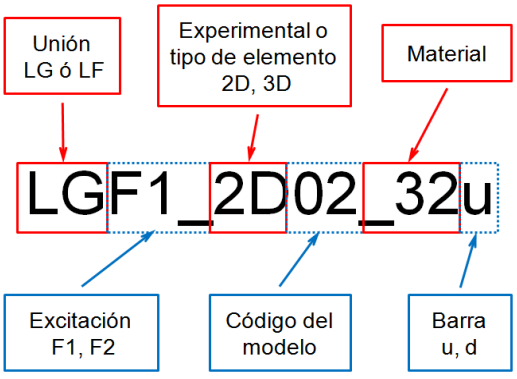



Figura 4: Denominación de los casos de las barras unidas en L.

Los resultados de las simulaciones realizadas con modelos LG2D y LG3D, utilizando los datos originales de las propiedades del material (Bateig32), muestran cierto desfase en las frecuencias propias respecto a los valores medidos en los ensayos, siendo similar tanto en la barra excitada (u) (Figura 5), como en la barra no excitada (d). Puede influir en la diferencia de resultados el hecho de que el modelo FEM considere un material continuo, y el modelo experimental tenga las barras unidas por adhesivo.

En las mismas figuras se puede apreciar que los modelos LG2D y LG3D proporcionan una respuesta bastante similar, por lo que se utilizará la barra excitada del modelo LG2D como referencia para analizar posibles modificaciones para el ajuste del modelo. Como parámetros de ajuste se utilizarán el módulo de Young y la densidad. En base a los resultados mostrados en la Figura 6, se tomarán como datos de referencia los del material Bateig25.

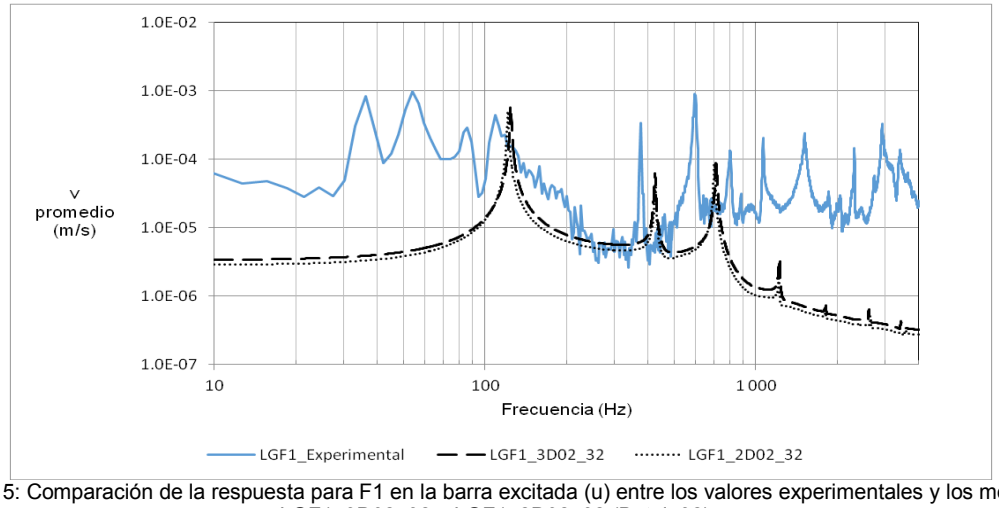



Figura 5: Comparación de la respuesta para F1 en la barra excitada (u) entre los valores experimentales y los modelos LGF1_3D02_32 y LGF1_2D02_32 (Bateig32).

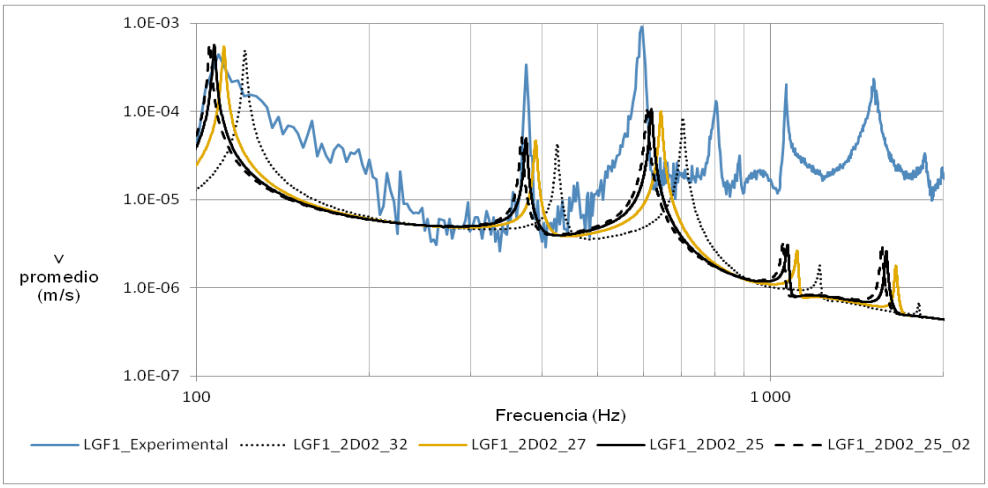



Figura 6: Comparación de la respuesta para F1 en la barra excitada (u) entre los valores experimentales y diferentes modelos LGF1_2D02 (módulos de Young y densidades).

La calidad de la malla se ha analizado con los resultados de las frecuencias propias para los primeros 24 modos. Se observan unos resultados similares, pero para analizar mejor esa similitud se valoran los porcentajes de variación en modelos. En la Figura 7 se muestran los porcentajes de variación en modelos LF2D02 y LF3D02, respecto al modelo LF2D03, tomado como referencia. Estos porcentajes son similares en todos los modos para los diferentes modelos.

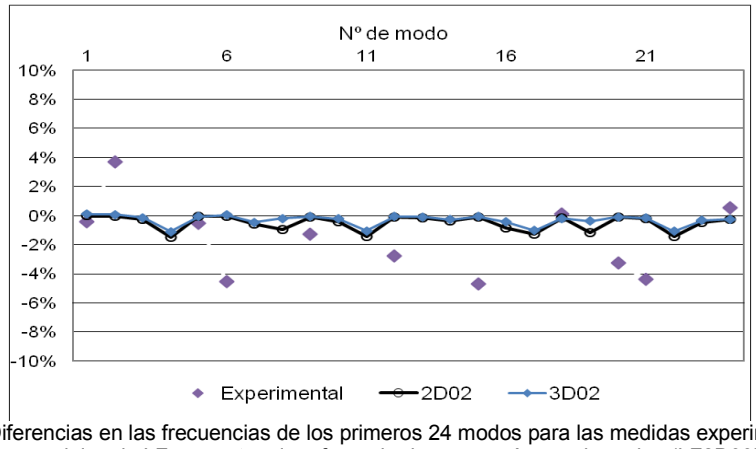



Figura 7: Diferencias en las frecuencias de los primeros 24 modos para las medidas experimentales y los modelos de LF respecto a la referencia de mayor número de nodos (LF2D03).

## 4. RESULTADOS

En este apartado se analizarán el nivel de velocidad ($L_{\mathrm{v}}$) y la diferencia de nivel de velocidad entre la barra excitada y la barra no excitada ($D_{\mathrm{v,ud}}$), en bandas de un tercio de octava. En el caso de $D_{\mathrm{v,ud}}$, también se calculará un valor único, promediado en frecuencia, como comparación global, de forma semejante a lo que se puede hacer con $K_{ij}$. El análisis se realizará para las uniones LG y LF.

En los modelos FEM LG, los resultados de la diferencia del nivel de velocidad son semejantes entre sí (Figura 8), sobre todo en frecuencias bajas, lo que confirma que la elección del modelo 2D parece adecuada. Las barras de error (valores máximo y mínimo) de los resultados del modelo de referencia, 2D02, muestran que los valores son bastante estables, sobre todo a frecuencias bajas. Respecto a los resultados experimentales, los valores también son similares, salvo en algunas bandas de frecuencias bajas.

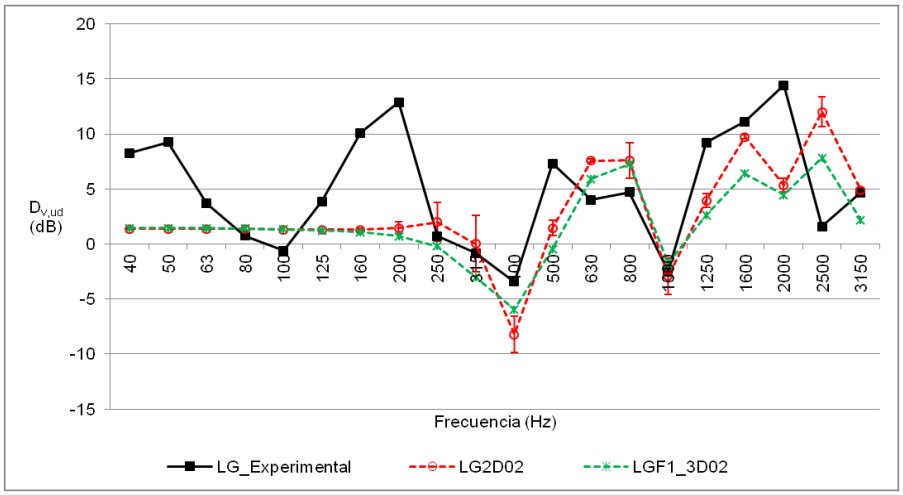



Figura 8: Diferencia de nivel de velocidad promedio en los resultados experimentales y en los modelos LG2D02 (promedio y valores máximo y mínimo) y LGF1_3D02.

En la unión LF, los resultados de la diferencia del nivel de velocidad entre las barras (u) y (d), en bandas de un tercio de octava, pueden verse en la Figura 9. Los valores experimentales y los del modelo de referencia (LF_2D02) son similares, salvo para bandas de frecuencias bajas. Las bandas de error del modelo LF_2D02 (valores máximos y mínimos) son mayores en frecuencias medias. El modelo LFF1_2D02_03, con un material con un coeficiente de amortiguamiento estructural nulo (Bateig25_03), no aporta mejores resultados.

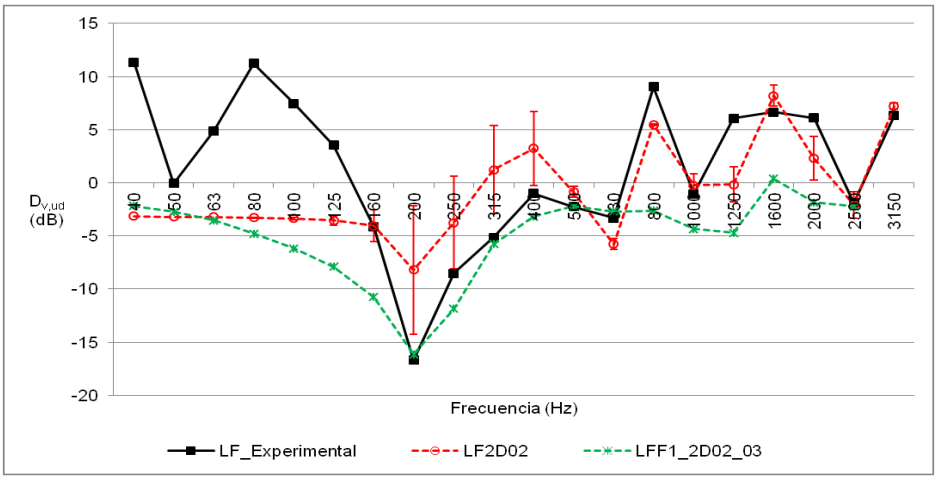



Figura 9: Diferencia de nivel de velocidad promedio en los resultados experimentales y en los modelos LF2D02 (promedio y valores máximo y mínimo) y LGF1_2D02_03.

Para seguir con la comparación de los resultados, se realizará un promediado en frecuencia de la diferencia de nivel de velocidad, para obtener un valor único. Se utilizarán dos rangos de promediado, uno será rango de frecuencias estudiado (40-3150 Hz) y el otro excluirá las bandas de frecuencias bajas que no suelen ser usadas en la normativa (100-3150 Hz). Los resultados muestran diferencias menores de 0,6 dB entre los dos rangos (Figura 10). Se tomarán como referencia los resultados del rango 100-3150 Hz, por ser el incluido en la normativa.

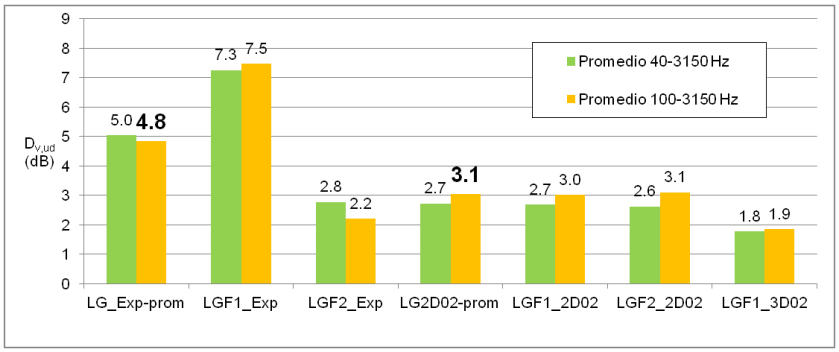



Figura 10: Diferencia de nivel de velocidad promediada en frecuencias en la unión LG. Valores experimentales y de modelos FEM, para diferentes excitaciones y promediados.

Los resultados promediados en frecuencias de la diferencia de nivel de velocidad, considerando las mismas bandas de tercio de octava que para la unión LG, se muestran en la Figura 11. Los resultados entre ambos rangos muestran diferencias que, en el caso de las medidas experimentales, es superior a 1 dB.

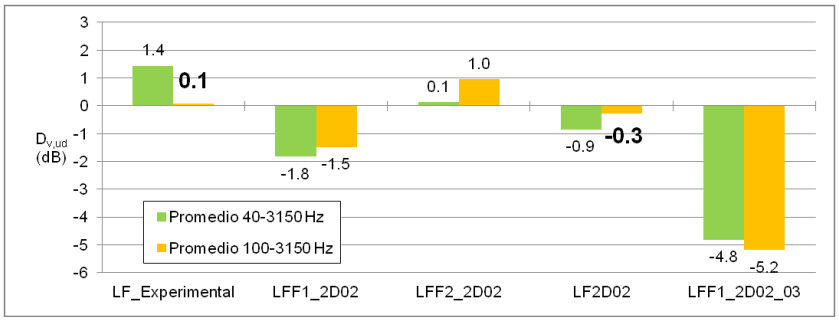



Figura 11: Diferencia de nivel de velocidad promediada en frecuencias en la unión LF. Valores experimentales y de modelos FEM, para diferentes excitaciones y promediados.

## 5. CONCLUSIONES

Como conclusión, puede decirse que los modelos LG2D02 y LF2D02, con material Bateig25, proporcionan resultados de la diferencia de nivel de velocidad, promedia en frecuencias, similares a los obtenidos experimentalmente. La diferencia es inferior a 1,7 dB, y podría ser menor ajustando los modelos en relación con este parámetro.

En cuanto a la evolución de la diferencia de nivel de velocidad con la frecuencia, aunque los resultados experimentales y FEM son semejantes, se detectan algunas diferencias significativas en las bandas de frecuencias bajas, tanto en LG como en LF. También se detectan diferencias significativas puntuales en algunos casos. Las diferencias entre el modelo experimental y el modelo FEM, en cuanto al uso de distintos tipos de excitaciones, condiciones de contorno de movimiento y la continuidad del modelo, podrían explicar las diferencias de resultados entre ambos, sobre todo en frecuencias bajas.

En todo caso, a la vista de los valores obtenidos, la aproximación conseguida con los modelos FEM se considera buena, y se podrían utilizar estos modelos para evaluar la influencia, en la diferencia de velocidad, de otros parámetros, como el material y dimensiones de las barras. El uso de modelos 2D ha permitido conseguir resultados aceptables con una simplificación significativa del modelo.

## REFERENCIAS

[1] Cremer, L., Heckl, M., & Petersson, B. A. (2005). Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies Springer.
[2] Guyader, J. L., Boisson, C., & Lesueur, C. (1982). Energy transmission in finite coupled plates, part I: Theory. Journal of Sound and Vibration, 81(1), 81-92.
[3] Simmons, C. (1991). Structure-borne sound transmission through plate junctions and estimates of sea coupling loss factors using the finite element method. Journal of Sound and Vibration, 144(2), 215-227.
[4] Mace, B. R., & Shorter, P. J. (2000). Energy flow models from finite element analysis. Journal of Sound and Vibration, 233(3), 369-389.
[5] Martín-Bravo, M., Magdaleno, J., García-Terán, J., & Tarrero, F. (2014). Aplicaciones del método de los elementos finitos en la transmisión estructural del sonido en edificios. Tecniacústica 2014, Murcia. pp. 931.
[6] Craik, R. J. M., Bosmans, I., Cabos, C., Heron, K. H., Sarradj, E., Steel, J. A., et al. (2004). Structural transmission at line junctions: A benchmarking exercise. Journal of Sound and Vibration, 272(3–5), 1086-1096.
[7] UNE-EN ISO 10848-1:2007. Acústica. Medida En Laboratorio De La Transmisión Por Flancos Del Ruido Aéreo y Del Ruido De Impacto Entre Recintos Adyacentes. Parte1: Documento Marco, (2007)
[8] Torres, J., Cárdenas, W., Carbajo, J., Segovia, E., & Ramis, J. (2012). Estudio de la radiación en vigas utilizando la técnicas de medición de holografía de campo cercano. *VIII Congreso Ibero-Americano De Acústica,*
[9] Segovia, E., Torres, J., Carbajo, J., & Ramis, J. (2013). Comparación de técnicas de caracterización de suelos flotantes. *Tecniacústica 2013,* Valladolid.
[10] Molina, P., Torres, J., Segovia, E., & Ramis, J. (2014). Estudio de la transmisión de las vibraciones usando modelos a tamaño reducido. *Tecniacústica 2014,* Murcia.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# UNIQUE AMBISONIC SOUNDS OF THE OLDEST FOREST IN EUROPE AND THE PROBLEM OF SILENCE RECORDING

PACS: 43.66. x, 43.66.+y, 87.18.Tt, 87.19.lc, 43.50.Rq

Jerzy Wiciak, Pawel Malecki
AGH University of Science and Technology
Department of Mechanics and Vibroacoustics
Al. Mickiewicza 30
30-059 Krakow, Poland
Tel: +48 617 3635
E-mail: wiciak@agh.edu.pl

## ABSTRACT

Constant climate and environmental changes, as well as concern about the future generations, oblige us to preserve, or at least, to record the current state, along with the natural soundscape. There are several techniques for soundfield recording available; however, for an accurate and versatile archiving and playback, careful selection must be provided. Because of the influence of the anthropogenic sounds which distribute over long distances, preservation of the pristine natural soundscape is very difficult. Therefore, there are few places in Europe to find natural environment, along with a unique soundscape, unspoilt. Undoubtedly, one of the places is the Bialowieza Forest, the oldest forest in Europe.
Many exceptional species of animals and plants are present there. Apart from the unique nature sounds, you can 'hear' the real and natural silence now and then. The article presents the process of ambisonic recordings and the measurement of sound pressure level. The data was gathered in the places of strict wildlife conservation over the course of one year. The article raises the issue of recording, as well as the measurement of very soft sounds in terms of their ambisonic playback.

## INTRODUCTION

There are few places in Europe to find natural environment, along with a unique soundscape, unspoilt. Undoubtedly, one of the places is the Białowieża Forest, the oldest forest in Europe. Many exceptional species of animals and plants are present there. Apart from the unique nature sounds, you can 'hear' the real and natural silence now and then. The soundscapes are associated with both social functions and time-spatial changes, or the places of residence. Social scientists, particularly anthropologists, emphasize the variety and forms of spatial arrangement of sounds and effects of soundscapes. The development of the area of studies on soundscapes indicates the possibility of creating a multi-sensory anthropology and sociology. The term 'soundscape' is well defined [1,2,3,4]. At the time being, wide-ranged research concerning its analysis and preservation is being carried out. The term 'natural soundscape' is, according to [5], an 'inherent acoustical environment of an area without the presence of human-caused sound". Nowadays, almost every place of human habitation is surrounded by din and noise most of the time. With the development of industry the environmental noise is obviously more perceptible. The most significant and common noise source is the road traffic. Additionally, the typical human soundscapes includes also the noise generated by industry, aircraft, wind turbines, railways, craft services, farms, playgrounds, municipal facilities, renovations, and household appliances.

Because of all the things mentioned, quietness seems to be unique these days. However, it has not been clearly defined. From the audiologic point of view, quietness is a signal, amplitude of which is lower than the auditory threshold (for every frequency). But we can differentiate between the acoustic concept of measurable quietness from audible quietness, which is a subjective psychological notion. Thus, if there are always some sounds in the air, it is interesting to find, what is the correlation between the perceptible values and the measurable ones and make an attempt to determine the threshold of quietness not in the audiometric sense as an ability to hear sounds, but as a definite, objective description of the state of the acoustic field.
In 2013, the Mechanics and Vibroacoustics Department of the AGH-UST in Kraków started a series of ambisonic recordings in the Niepołomice Forest (a National Park located 50km from Kraków) [6]. Because of the neighbouring motorway, railway track and households, anthropogenic noise was audible even in the outermost corners of the forest. That is why, the recordings along with the measurement of the sound level, were made in the Białowieża Forest – the oldest and best preserved forest in Europe. It has been noticed from the very beginning that in some places of the forest there is no sound at all, for a very long time. In details, there are no anthropogenic sounds. Subsequently, it has been decided that a record as accurate as possible has to be made to save the unique circumstances. The aim was to capture the uniqueness of the place and its atmosphere in order to make further research of the soundscape, as well as to create a point of reference for other, similar places; also, in case of any future needs.

## UNESCO HERITAGE LIST AND BIALOWIEZA FOREST

A UNESCO World Heritage List [7] is list with sites (such as a building, city, complex, desert, forest, island, lake, monument, or mountain) that have been nominated for the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization's International World Heritage program. The program aims to catalogue and preserve sites of outstanding importance, either cultural or natural, to the common heritage of humankind. There are fourteen objects in Poland inscribed under the UNESCO's World Heritage List and for two years in the Department of Mechanics and Vibroacoustics AGH-UST there are conducted extensive research related to acoustics properties of Unesco objects.
Searching for a soundscape where quietness reigns is in accord with the definition of the soundscape ecology and is a special case of the acoustic environment of the contemporary man. The authors have carried out their investigations in the area of the Bialowieza National Park.
Bialowieza Forest has been designated a UNESCO World Heritage Site, a UNESCO Biosphere Reserve, and an EU Natura 2000 Special Area of Conservation. The oldest forest in Europe preserved in its virtually natural condition. The recording and measurements were performed at selected characteristic locations at which the level of the acoustic background was registered at favorable weather conditions. In a spot most remote from human settlements it is a location in the strict nature reserve where it is possible to see all indigenous animals and birds subject to strict species protection in Poland. Also in a spot located close to a road. Since it serves as an animal feeding point, it is frequented visited by wisents (European bisons) in the winter. And in a location on the border between the natural environment and human settlements. It is a meadow in which one can find several species of animals and birds protected in Poland. At the same time, the closest human dwellings are just 0.5 km away from it. The Białowieża National Park is situated in the north-east part of Poland, in podlaskie voivodeship (Figure 1). Its beginnings can be traced back to 1921, when the “Reserve” forestry was created at the place currently occupied by the Park.



Figure 1: Location of the Bialowieza Forest

The Białowieża Forest covers the area of 5725,75 ha and is under strict protection. Białowieża Forest is the last natural forest at the European Lowland Area, having the primaeval character, identical with the one which covered the area of deciduous and coniferous forests years ago. The characteristic feature of the park is its biological diversity. The Bialowieza Forest comprises about 809 vascular plants species, over 3 thousand cryptogams and fungi species, almost 200 moss species and 283 lichen species. There have been more than 8 thousand invertebrates species, approximately 120 species of breeding birds and 52 mammal species. Old, primaeval forest stands in Białowieża National Park are characterized by large amounts of deadwood at the various stage of disintegration, and by the presence of typical natural forest species. Apart from Białowieża Forest, many of the aforementioned species can be identified only in few places worldwide. European bison – the biggest European land mammal [8]. Photo in Figure 2 shows mobile recording station at the gate of the Bialowieza Forest.


Figure 2: Mobile recording station [9] at the Bialowieza Forest

## AMBISONIC RECORDINGS

Ambisonic recordings of natural soundscape at the Białowieża Forest were carried out from August 2014 to June 2015. The recordings and measurements were made during every of the four seasons of the year. B-format material of over 160 GB was recorded, which constitutes about 114 hours of recordings with the sampling frequency of 44 100 Hz and the 24 bits resolution. Recordings were conducted using first order ambisonic microphone SoundField ST350 with AD/DA converters and preamplifiers integrated in RME Fireface 800 device.
Mobile recording station (Figure 2), thanks to solar power and batteries, provides the possibility of long-term recording, without raising the level of background noise. It is equipped with a hard-disk system for storing recordings, a set of analog to digital converters, and a system for monitoring the recorded signal. Size and functionality of the vehicle also allow the installation of racks and microphone stands to provide the required functionality and weather resistance.
Natural sounds, which are present during the four of the seasons of the year, were recorded. The recordings start with an early spring morning which then turns into summer day and night. Then, typical sounds present during an autumn evening were saved, as well as sounds of a winter night and the beginning of a winter day. The choice was made because of the frequency of occurrence of such typical sounds during these times. A, so called, 'typical ambient' for the times of the day mentioned was recorded. Also, plenty of unique sounds connected with many kinds of birds, insects and mammals were recorded. Both typical and unique types of birds: jay, nutchach, great tit, robin, great spotted woodpecker, blackbird, black woodpecker, firecrest, tawny owl. A roebuck in the early morning and a fox at night emitting warning signs together with a wisent looking for food at night. At the autumn there were the rut from different distances, in the evening recorded together with crickets and flying insects.

## NATURAL QUIETNESS?

The studies of quietness were performed at three selected characteristic locations at which the level of the acoustic background was registered at favorable weather conditions: Dziedzinka is a spot most remote from human settlements it is a location in the strict nature reserve where it is possible to see all indigenous animals and birds subject to strict species protection in Poland. Ostoja is a spot located close to a road. Since it serves as an animal feeding point, it is frequented visited by wisents (European bisons) in the winter. Gruszki is a location on the border between the natural environment and human settlements. It is a meadow in which one can nd several species of animals and birds protected in Poland. At the same time, the closest human dwellings are just 0.5 km away from it.
For many of the periods of time recorded, very low levels of sound occurred. The team which was carrying out the recordings, named it to be a complete silence. Along with the recordings, measurements of the sound level were made. The analysis of the results provoked thought whether the recordings were correct. The reason for that was that the recording and the metrological apparatus' sensitivities were ill-matched. It turned out that the periods of silence occurring naturally, are below the measurement range applied, and, much less below the noise of the ambisonic microphone itself. Within additional, sound analyzer SVAN 959 with microphone 40AE by G.R.A.S. and a microphone preamplifier SV12L was subjected to examination in the anechoic chamber. The device has two measurement ranges (LOW and HIGH) and two operating modes (sound meter and sound analyzer). In the instruction manual of the device, the manufacturer declares the measuring range of the values of sound starting from 12 dBA but does not define the range of measurement of 1/3-octave bands. Due to very low values of acoustic pressure in particular bands of 1/3-octave frequencies, it proved to be necessary to describe the results of the measurements of the acoustic pressure levels with respect to the measurement range of the used wave analyzer. Measurements of electrical and acoustic noise of the device were executed for a typical measuring set configuration (microphone, preamplifier, extension cord, meter) with the compensation filters and calibration corrections appropriate for measurements in the free field. In the examination of the electrical noise of the device, the microphone was replaced by a 18 pF capacitor representing impedance of a microphone, while the acoustic noise was measured in the anechoic chamber. The

measurements were executed due to the difficulties occurring during the attempt to record sounds with low level of acoustic pressure. Analyzing the results of examination of the noises produced by the measuring system working as a sound level meter (measured at the AGH University of Science and Technology and declared by the manufacturer) we can state that the values of the measured sound levels A in the Białowieża Forest are above the levels of noise produced by the measuring device (Figure 3).

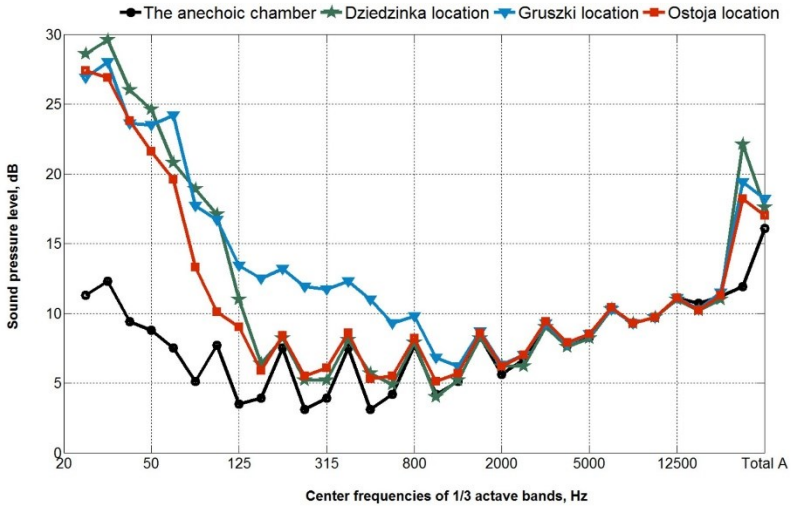



Figure 3 Comparison of results of spectrum analysis of the acoustic pressure measurements in 1/3-octave bands taken in the Bialowieza Forest (at three different locations) in quietness and in the anechoic chamber for 15-minute time intervals.

On the other hand, the analysis of the self-generated noise produced by the device working as a sound analyzer in 1/3-octave bands shows that in the range of selected frequency bands, this sound analyzer is not able to measure as low values of acoustic pressure as those occurring in the Forest.

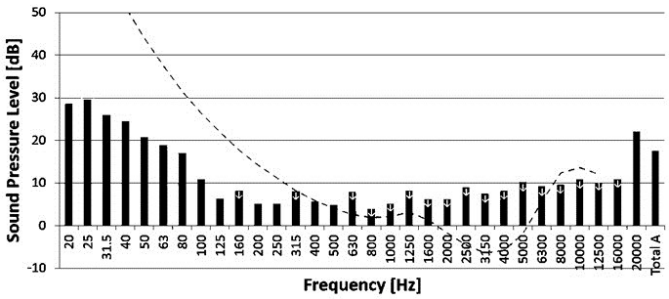



Figure 4 Spectrum of the sound pressure level in 1/3 octave bands recorded at night at Bialowieza Forest.

The spectrum of the sound pressure level in 1/3-octave bands is shown in Figure 4. Measurement was taken for 15-minute time interval. Very low value of A-weighted sound level was measured (17.0 dBA). It is the lowest level recorded throughout the night but additional statistical distributions of levels shown, that this range of values has last for more than 90 percent of nighttime [10]. This kind of levels are rarely occurring in other areas, in the surround of noises coming from roads, industrial objects, housing estates, or agricultural activity in the acoustic background.

In the diagram in Figure 4, apart from the measured signal, the absolute threshold of hearing (0-phons according to [11]) was marked as well as the frequency bands in which the values of the signal amplitudes were below the measuring system's own noises. The absolute threshold of hearing was marked with a dashed line while the bands for which the signal could reach values lower than the recorded ones, due to the limitations of the lower measurement range of the equipment, were marked by arrows on particular bars. The presented results indicate that, the

measured values of the levels of sounds within the measuring range of the set-up were below the human threshold of hearing. For the bands of medium and high frequencies, to which human ear is most sensitive, the used measuring system is characterized by its own noises far above the threshold of hearing. The physical value of the acoustic pressure for the indicated range of frequencies is very low but its precise value is unknown. We might guess that it is the values of the acoustic pressure that significantly influence the perception of silence because in the subjective experience of the people taking the measurements, their experience was highly different from the quietness that is perceive in the laboratory conditions of an anechoic chamber. The self-noise of the ambisonic microphone used, declared by the producer [12], is much higher than in case of the measurement microphones. That is why, all signals of too low a level, are masked by noise. Even after slight intensification of the recording system, they are becoming awkward and are not to be trusted.

**SUMMARY**

Life in a noise, especially in huge urban agglomerations, has a harmful effect on human health and mental condition. Quietness understood as absence of undesired sounds or sounds in general may be vexing and worrisome or, just the opposite, evoke the feeling of comfort. This aspect of quietness may be considered an important component of the quality of life and is connected with human biological and mental health [13]. This phenomenon must be perceived in two aspects: acoustical and psychological. In quietness, a human being relaxes, takes a rest, calms nerves, and at the same time regenerates the hair cells in the hearing organ, so after coming back to the world hustle, he/she is able to function in this acoustically aggressive environment. Having reached the oldest forest in Europe, the Bialowieza National Park, the authors recorded silence generated by the nature in favorable weather at night. Answering the research question concerning quietness present in nature posed above in the Introduction, they recorded the state of acoustic background at the level of 17 dB. In the Bialowieza National Park, this silence has also other aspects, psychophysical conditions included the sense of space, perception of beauty, etc. Considering silence from the psychological point of view we should mention that the response to noise and to the absence of sounds is connected not only with the general nervous sensitivity, age, and habits, but also with the health condition and the level of exhaustion. Therefore, determining the limit value of sound pressure above or below which we can speak of quietness, depends on too many variables connected with perception of an individual person. Additionally, in order to measure such low levels of sound pressure and to analyze the spectra of the measured sounds, it is necessary to have the equipment (sound analyzers) with well-described ranges of the measured sounds and well-defined internal noises for different measuring configurations.
Because of the changing climate and increasing anthropic activities, archiving of the soundscape is essential. The recordings and measurements made in a place as unique as the Białowieża Forest, which is a member of the UNESCO World Heritage List, come as important, but not sufficient activities. Further series of similar recordings and measurements are needed to be done in places equally untamed and abundant, such as, for example, the Carpathian Mountains, the Alps or other places in Europe where unique and well-conserved ecosystems still exist. The recordings, measurements and attempts to play the records, showed that there is a problem with the apparatus' wrong range as to the measurements, as well as too much self-noise occurring. Detailed measurements of the electroacoustic track were made and the conclusions were that it is necessary to use an additional, low self-noise microphone, as well as it is essential to process and play sounds, which are on the verge of the hearing threshold, separately. The optimal approach would be to construct a low-noise ambisonic microphone. The other solution is using dynamic processors or applying pressure signal only and to perform additional ambisonic panning with it.

**ACKNOWLEDGMENTS**

This research was partly supported by AGH University grant no. 11.11.130.995 and 15.11.130.748. The authors wish to express their gratitude to the staff of the Białowieża National Park for their support.

**REFERENCES**

[1] Aucouturier, Jean-Julien, Boris Defreville, and François Pachet. The bag-of-frames approach to audio pattern recognition: A sufficient model for urban soundscapes but not for polyphonic music. The Journal of the Acoustical Society of America 122.2 (2007): 881-891
[2] Dubois, Daniele, and Sophie David. A cognitive approach of urban soundscapes. The Journal of the Acoustical Society of America 105.2 (1999): 1281-1281
[3] Schulte-Fortkamp, Brigitte, and Andre Fiebig. Soundscape analysis in a residential area: An evaluation of noise and people's mind. Acta Acustica united with Acustica 92.6 (2006): 875-880
[4] Jeon, Jin Yong, et al. Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds. The Journal of the Acoustical Society of America 127.3 (2010): 1357-1366
[5] Maher, Robert C. White Paper: Obtaining long-term soundscape inventories in the US National Park System. Montana State University, Bozeman 2004
[6] Piechowicz, Janusz, et al. Sounds in the Niepołomicka Forest (Natura 2000). 7th forum acusticum 2014 ; 61st open seminar on acoustics ; Polish Acoustical Society – Acoustical Society of Japan special session stream : Kraków, 7–12.09.2014
[7] UNESCO: http://whc.unesco.org/
[8] Białowieża Park, URL: http://bpn.com.pl/
[9] Wierzbicki, J., and W. Batko. Detection of noise sources in monitoring systems. The Journal of the Acoustical Society of America 131.4 (2012): 3258-3258
[10] Wiciak, J., et al. Quietness in the Soundscape of the Białowieża National Park. Acta Physica Polonica A 128.1A (2015)
[11] ISO, 226: 2003: Acoustics–Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization (2003)
[12] Soundfield ST350 Manual, URL:
http://www.radikaltr.com/LeCatalogue/images/attachments/Soundfield_ST350_Manual.pdf
[13] T. Olearczyk, Quietness in Theory and Practice, Krakowskie Towarzystwo Edukacyjne, Krakow 2014 (in Polish).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA WAVE FIELD SYNTHESIS (WFS) SOBRE NODOS ACÚSTICOS DISTRIBUIDOS

PACS: 43.60.Gk

Mihaita Lupoiu[1]; Jose A. Belloch[2]; Enrique S. Quintana-Ortí[2]; Alberto Gonzalez[1]; Antonio M. Vidal[3]

1 Institute of Telecommunications and Multimedia Applications, Universitat Politècnica de València, camino de vera s/n 46022 Valencia, España, milu@upvnet.upv.es, agonzal@dcom.upv.es

2 Dpt of Computer Science and Engineering (ICC), Universidad Jaume I de Castellón, Av. de Vicent Sos Baynat, s/n 12071 Castellón de la Plana, España. jbelloch@uji.es, quintana@uji.es.

3 Dpt de Sistemas Informáticos y Computación, Universitat Politècnica de València, camino de vera s/n 46022 Valencia, España, avidal@dsic.upv.es

## ABSTRACT

Wave Field Synthesis (WFS) is a spatial audio reproduction system that provides an accurate spatial sound field in a wide area. When the system involves multiple loudspeakers and multiple sound sources, the computational requirements increase meaningfully. The configuration of a distributed system composed of acoustic nodes allows us not only to implement a modular and scalable system, but also to share the computational load among all nodes. An important issue to tackle in distributed systems is the synchronization among all nodes, even more when spatial effect perception depends on the accurate delays in the sound signals. The present work analyzes synchronization issues for two different node distributions that implement a WFS system.

## RESUMEN

El sistema WFS es un sistema de reproducción de audio que recrea con bastante verosimilitud el campo producido por una fuente sonora dentro de una área de escucha. Cuando el número de fuentes a sintetizar y de altavoces en el sistema es amplio, los requisitos computacionales aumentan significativamente. La elaboración de sistemas distribuidos nos permite poder implementar un sistema modular y escalable, al tiempo que la carga computacional requerida por la implementación es repartida entre sus diferentes nodos. Un problema importante a resolver por estos sistemas distribuidos es la sincronización entre nodos ya que es un factor limitante para muchas aplicaciones de audio. El presente trabajo analiza el sincronismo que existe entre nodos para dos tipos de sistemas distribuidos que implementan un sistema WFS.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha surgido un creciente interés en mejorar la experiencia sonora y más concretamente en la generación del sonido espacial. Hoy día, uno de los sistemas de reproducción de audio espacial más prometedor es Wave Field Synthesis [1][2], en el que un campo sonoro se sintetiza con alta calidad en un área amplia de escucha por medio de un número elevado de altavoces. El sistema WFS está basado en la creación de un campo sonoro determinado en una zona de escucha (generalmente en 2D a la altura de las cabezas de los

oyentes) mediante la interferencia de los sonidos producidos por un números de fuentes sonoras puntuales (fuentes sonoras secundarias). La Figura 1 muestra como la interferencia de los sonidos emitidos por los altavoces produce una onda cuyo frente de ondas equivale a una fuente virtual situada detrás del array de altavoces (que en este caso sería un piano).

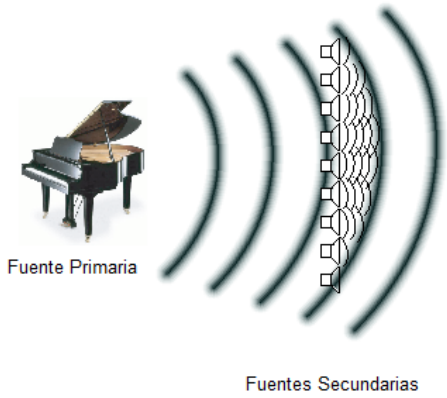



Figura 1. Fundamentos del sistema Wave Field Synthesis.

En un sistema donde el número de altavoces puede incluir desde decenas a centenas, existen muchas operaciones que se realizan para cada uno de los altavoces del sistema, lo que requiere una alta capacidad computacional, y por tanto, una gran demanda de energía. Estos dos requisitos anteriores pueden reducirse si utilizamos un sistema distribuido compuesto por varios nodos acústicos donde cada nodo se encargue de procesar las señales de un número limitado de altavoces. Cada nodo acústico estará compuesto por un procesador de bajo consumo y en base a la posición de las fuentes sonoras del sistema activará o desactivará sus altavoces.

El principal problema cuando implementamos una aplicación WFS sobre un sistema distribuido es el sincronismo entre sus nodos, pues el éxito de la aplicación de WFS depende de la interferencia constructiva de las señales emitidas por los altavoces. En este artículo hemos analizado el comportamiento de las placas Jetson Kit [3] cuando éstas se usan como nodos acústicos, así como el nivel de sincronismo que se obtiene entre los diferentes nodos.

El artículo se estructura de la siguiente forma. La Sección 2 analiza y diseña un sistema WFS sobre un sistema distribuido. Las prestaciones computacionales de un sistema WFS sobre un nodo acústico son mostradas en la Sección 3. Finalmente, la Sección 4 resume las principales conclusiones de este trabajo.

## 2. ANALISIS DE SINCRONISMO PARA DISEÑAR UN SISTEMA WFS SOBRE UN SISTEMA DISTRIBUIDO

Un sistema distribuido está formado por varios nodos acústicos que intercambian información para conseguir de manera colaborativa un fin común. En este caso, el fin común es la Síntesis de Campo Acústico, el cual, requiere máxima sincronización entre los nodos. La plataforma utilizada para implementar el nodo acústico es el la placa Jetson Development Kit [3], la cual está compuesta por el procesador Tegra X1, el cual, está compuesto a su vez por una GPU de 192 cores y un procesador ARM de 4 cores. Para esta implementación únicamente haremos uso de un único core de ARM. Para el resto del artículo, nos referiremos como Jetson al nodo acústico.

### 2.1 Diseño Inicial de la red de nodos

El primer diseño consistió en configurar un sistema compuesto por dos Jetsons y comprobar cómo se pueden sincronizar entre ellos. Para ello, una Jetson toma el papel de Master-Servidor, ya que su reloj será usado como referencia en el sistema, mientras que la otra toma el papel de Esclavo-Cliente.

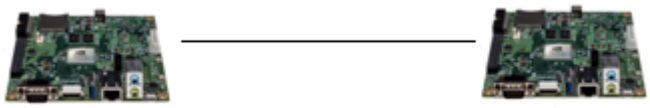


Figura 1. Sistema compuesto por dos Jetsons.

Para sincronizar las Jetsons se ha utilizado el protocolo **P**recision **T**ime **P**rotocol (PTP) cuyo objetivo es sincronizar relojes en una misma red. Existen dos modos de utilizar el protocolo PTP: por hardware y por software. Si lo usamos a través de hardware, este protocolo es capaz de conseguir precisiones de nanosegundos. Esta precisión supera a la que se obtendría si se utilizara el protocolo estándar **N**etwork **T**ime **P**rotocol (NTP) que se utiliza comúnmente para sincronizar relojes de cualquier computador y cuya precisión es de apenas milisegundos [4] [5].

El sistema operativo instalado en las Jetsons es Ubuntu 14.10, que tiene soporte para la sincronización de protocolo PTP y sigue el estándar IEEE 1588 para Linux. Un paso importante antes de usar el protocolo es comprobar la compatibilidad de la interfaz Ethernet con el protocolo mediante la herramienta ethtool [6].

Si utilizamos el protocolo PTP por hardware, es importante comprobar que en la tarjeta ethernet nos aparezcan estos parámetros:

```
SOF_TIMESTAMPING_RAW_HARDWARE
SOF_TIMESTAMPING_TX_HARDWARE
SOF_TIMESTAMPING_RX_HARDWARE
```

Mientras que si utilizamos el protocopolo PTP por software, deberá aparecer:

```
SOF_TIMESTAMPING_SOFTWARE
SOF_TIMESTAMPING_TX_SOFTWARE
SOF_TIMESTAMPING_RX_SOFTWARE
```

Si ejecutamos en la Jetson el comando ethtool, observamos lo siguiente:

```
#]~$ ethtool -T eth0
Time stamping parameters for eth0:
Capabilities:
       software-transmit     (SOF_TIMESTAMPING_TX_SOFTWARE)
       software-receive      (SOF_TIMESTAMPING_RX_SOFTWARE)
       software-system-clock (SOF_TIMESTAMPING_SOFTWARE)
PTP Hardware Clock: none
Hardware Transmit Timestamp Modes: none
Hardware Receive Filter Modes: none
```

Lo que nos devuelve el comando ethtool nos indica que la Jetson solo dispone de sincronización por software en la tarjeta ethernet integrada. Por tanto, esto podría empeorar la sincronización, ya que existe un tiempo de comunicación adicional entre ambas Jetsons, tal y como se aprecia en la Figura 2, la cual, muestra el intercambio de mensajes del protocolo PTP por software [7].

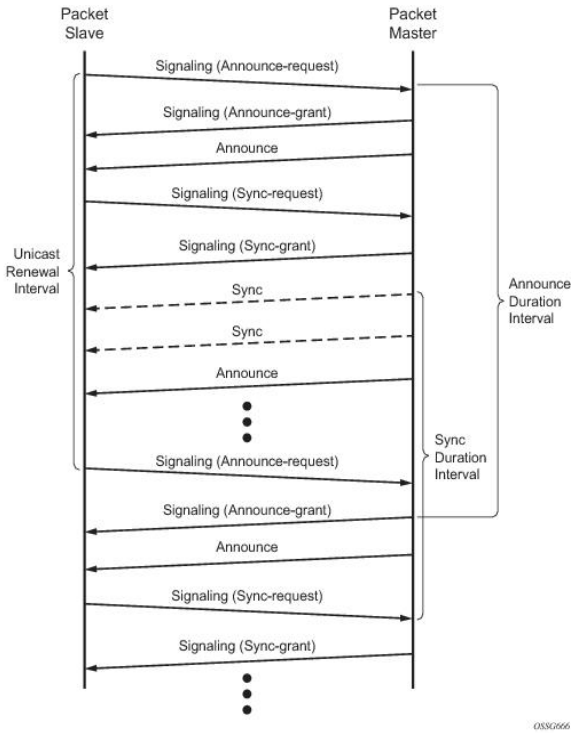



Figura 2 Secuencia de mensajes entre los rejoles PTP del esclavo y maestro [7]

Una vez configuradas las Jetsons para ser usadas con el protocolo PTP por software, es necesario evaluar la viabilidad de la aplicación WFS. Para ello, se va a realizar múltiples medidas de tiempo en ambas Jetsons de cara a evaluar su sincronismo. Estas medidas están mostradas en la Figura 3.

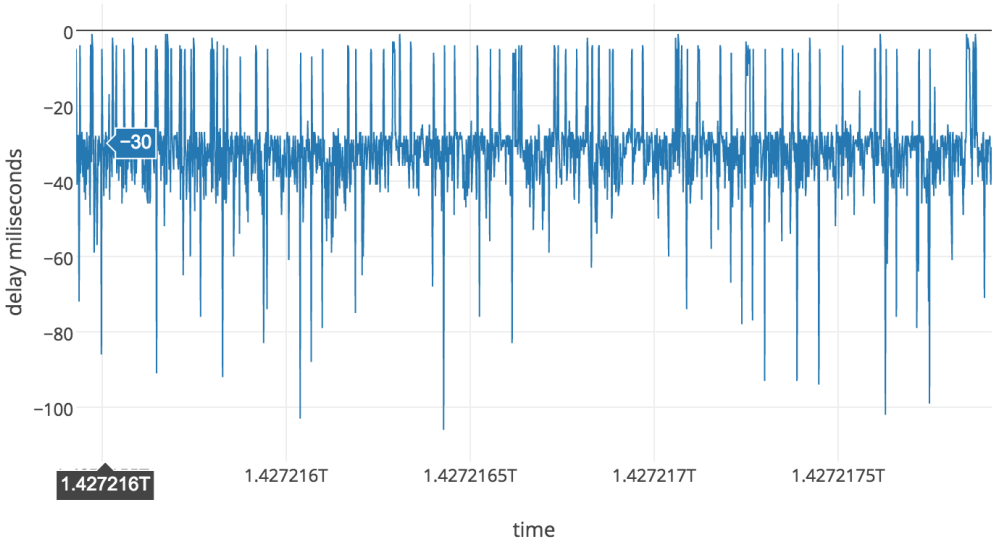



Figura 3 Tiempos de sincronización entre la Jetson Master-Servidor y la Jetson Esclavo-Cliente.

De la Figura 3, podemos extraer un primer resultado y es que, en media, entre ambas Jetsons existe un desfase de 30 milisegundos. Este valor hace inviable a un sistema acústico de síntesis de onda donde se requiere un máximo desvío de sincronización de 5 ms [8]. En el caso de que el desfase fuera superior a 5 ms, un oyente percibiría un sonido más un eco en lugar de un único sonido. Por tanto, debemos buscar un diseño que reduzca el tiempo de sincronismo entre las Jetsons.

### 2.2 Diseño de una red con reloj en un dispositivo externo

Una alternativa al diseño anterior consiste en usar una máquina independiente que estuviera conectada a la red a la que se conectan las Jetsons y que se usara únicamente como referencia temporal. La Figura 4 muestra el esquema del sistema donde el reloj representa la máquina que ofrece la referencia temporal y que jugará el papel de Maestro-Servidor. A la red también se conectará un computador de propósito general que será usado por un usuario para ejecutar la aplicación del WFS, es decir, introducirá numero de fuentes y las posiciones que tendrán éstas en el sistema WFS.

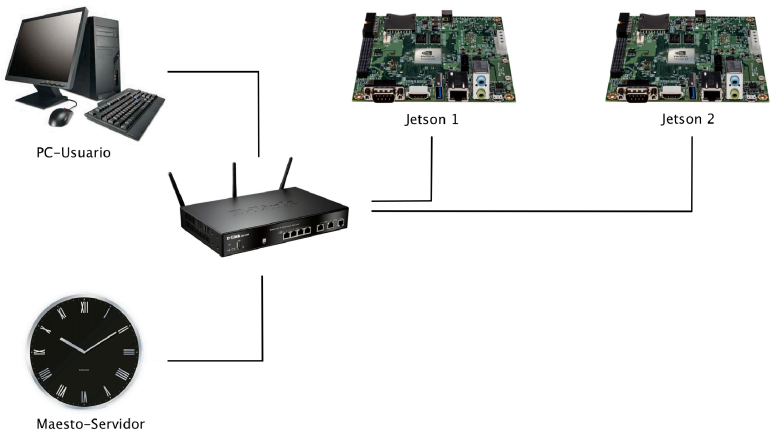



Figura 4. Esquema del sistema compuesto por dos Jetsons, una máquina usada como referencia temporal (Maestro-Servidor) y un ordenador de propósito general.

Una vez montado el nuevo sistema de distribución, ejecutamos primeramente el protocolo PTP en el Maestro-Servidor para que comparta su reloj. Posteriormente, ejecutamos este mismo protocolo en las Jetsons, los cuales, actuarán como Esclavo-Cliente. Al cabo de unos segundos después de haber ejecutado el protocolo en las Jetsons, éstas quedarán sincronizadas con el Maestro-Servidor. El hecho de que en esta distribución ambas Jetsons tomen el mismo papel de Esclavo-Cliente, hace que ambas estén desfasadas en el mismo tiempo con respecto al Maestro-Servidor, y a su vez estén sincronizadas entre ellas. La Figura 5 muestra el desfase en milisegundos entre cada una de las Jetsons y el Servidor.

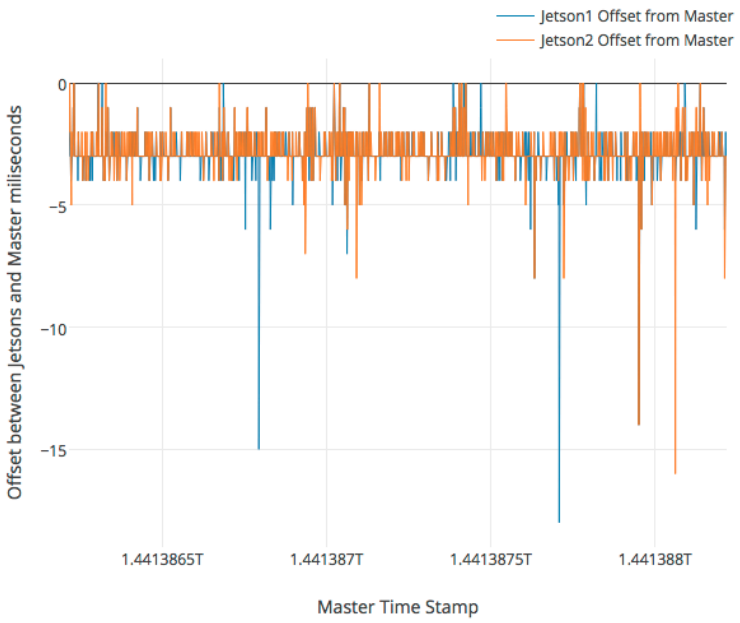



Figura 5. Diferencia de tiempos entre las Jetsons en modo Esclavo-Cliente respecto al Maestro-Servidor.

Por otra parte, la Figura 6 muestra cómo la diferencia de tiempos entre las dos Jetsons no supera mayoritariamente los 5 milisegundos.

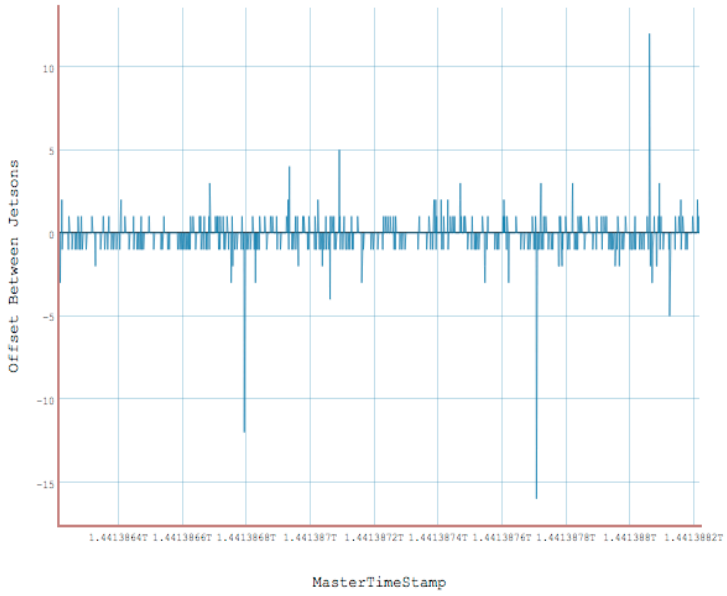



Figura 6. Diferencia de tiempos de sincronización entre las dos Jetsons.

Para poder comprobar de manera más fiable el sincronismo que existe entre las Jetsons, hemos tomado 2000 muestras de reloj de cada una de ellas y hemos calculado su diferencia. Como se puede apreciar en la Tabla 1, más del 80% del tiempo están totalmente sincronizadas y más de un 15% del tiempo están sincronizadas con 1 milisegundo de diferencia. Estos datos muestra la alta sincronización que existe entre las dos Jetsons. A pesar de estos buenos resultados, queda un ínfimo porcentaje (0.15%) de tiempo en que las Jetsons están desincronizadas.

| **Milisegundos de diferencia entre Jetsons** | 16 | 12 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Numero de repeticiones** | 1 | 2 | 2 | 2 | 14 | 34 | 303 | 1642 |
| **%** | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,7 | 15,15 | 82,1 |

Tabla 1. Error temporal de sincronismo que existe entre las Jetsons.

## 3. PRESTACIONES COMPUTACIONALES

Por otra parte, hemos analizado las prestaciones computacionales que ofrece el procesador ARM de una Jetson. Para ello, hemos medido el tiempo invertido por el procesador para generar las señales de salida variando el tamaño de los buffers de muestras y el número de altavoces, y el número de fuentes que reproducen a 4. La Figura 7 muestra como el tiempo de procesado aumenta de manera lineal tal con el incremento del tamaño del buffer y el número de altavoces.

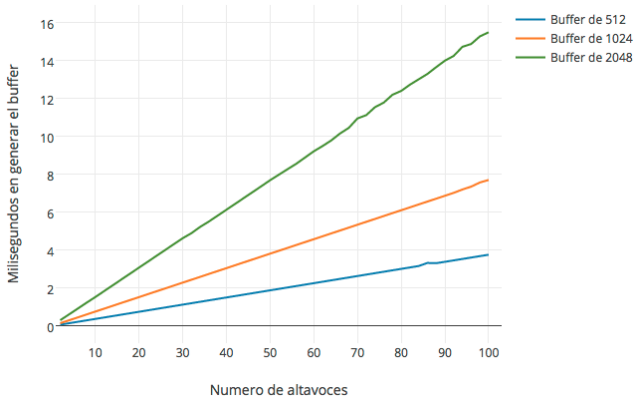



Figura 7. Tiempo de procesado empleado por una Jetson para diferentes tamaños de buffers de muestras y número de altavoces.

## 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo hemos analizado las prestaciones que ofrece la placa Jetson kit si ésta se utiliza como nodo acústico para implementar un sistema WFS distribuido. Los resultados muestran que las Jetsons pueden funcionar como nodo acústico en un sistema WFS siempre que se utilice una máquina externa que ofrezca una referencia temporal. Aún así existe un mínimo porcentaje de tiempo (0.15%) donde se pierde el sincronismo. Futuros trabajos tratarán de reducir u ofrecer soluciones para reducir aún más este porcentaje de desincronización.

## 5. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido financiado por TIN2011-23283, TIN2014-53495-R, TEC2012-38142-C04-01 PROMETEO FASE II 2014/003, P1-1B2013-20 y EU FEDER.

## 6. REFERENCIAS.

[1] A.J. Berkhout, “An holographic approach to acoustic control”, Journal of the Audio Engineering Society, vol.36, pp.977–995, December 1988.
[2] A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, “Acoustic control by wave field synthesis”, Journal of Acoustic Society of America, vol. 93(5), pp. 2764–2778, May 1993.
[3] Mobile GPU: Jetson, http://developer.download.nvidia.com/embedded/jetson/TK1/docs/Jetson_platform_brief_May2014.pdf, (22 Noviembre2014 ).
[4] “NTP and PTP (IEEE 1588) A Brief Comparison”, 2010, en4tel.com http://www.en4tel.com/pdfs/NTPandPTP-A-Brief-Comparison.pdf, (8 Septiembre 2015).
[5] “Comparing NTP and PTP”, 2015, FSMLabs, http://www.fsmlabs.com/news/2015/03/12/ptpvsntp.html, (8 Septiembre 2015).
[6] “Red Hat Enterprise Linux 6 Deplyment Guide”, Red Hat, (8 Septiembre 2015), https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Linux/6/html/Deployment_Guide/s1-Using_PTP.html.
[7] “Network Synchronization”, https://infoproducts.alcatel-lucent.com/html/0_add-h-f/93-0070-10-01/7750_SR_OS_System_Basics_Guide/System-Intro.html, (8 Septiembre 2015).
[8] J. Blauert. "Spatial Hearing-Revised Edition:The Psychophysics of Human Sound Localization" The MIT Press, 1996.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# COMBINING SPATIAL REPRODUCTION TECHNIQUES FOR ROOM ACOUSTIC AURALIZATION

PACS: 43.6c, 43.38Md

Kohnen[1], Michael; Pelzer[1], Sönke; Aspöck[1], Lukas; Vorländer[1], Michael;
[1]Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, Kopernikusstr. 5, 52074 Aachen, Germany
mko@akustik.rwth-aachen.de

## ABSTRACT

3-D audio reproduction techniques differ in their performance of delivering cues needed for spatial perception of a sound field. For room acoustics situations, human perception is based on different cues during the different phases of a room impulse response. In case of spatial reproduction based on simulated room impulse responses, the reproduction quality can be optimized by choosing different reproduction techniques for each part of the impulse response. The aim is to compensate the weaknesses and to benefit from merging their strengths. Listening tests were performed to evaluate aspects of the applied reproduction methods.

## RESÚMEN

Técnicas de reproducción de audio 3-D difieren en su desempeño de la entrega de las señales necesarias para la percepción espacial de un campo de sonido. Para situaciones de acústica de salas, la percepción humana se basa en diferentes señales durante las diferentes fases de una respuesta al impulso de una habitación. En el caso de la reproducción espacial basada en las respuestas de impulso de la sala simuladas, la calidad de reproducción se puede optimizar mediante la elección de diferentes técnicas de reproducción para cada parte de la respuesta de impulso. El objetivo es compensar las debilidades y beneficiarse de la fusión de sus puntos fuertes. Se realizaron pruebas de escucha para evaluar los aspectos de los métodos de reproducción aplicadas.

## 1. INTRODUCTION

Nowadays visual **V**irtual **R**eality systems (VR-Systems) have entered consumer markets in form of **H**ead **M**ounted **D**isplays (HMDs) and 3-D cinema technology. In research & development CAVE systems exist that provide a realistic holographic environment. The acoustic feedback in these VR systems should be spatially rendered and reproduced in a similar realistic quality as the stereoscopic visual feedback. Users should be able to freely move and interact with the environment which requires an in-time calculation of the sound propagation using room acoustic simulation algorithms to determine the transfer path from the source to the receiver, the **R**oom **I**mpulse **R**esponse (RIR), and to allow for a realistic experience. The reproduction of the RIR can be done using binaural technology played backed over headphones. Achieving a good channel separation this technology lacks in providing bone-structure sound, especially for low frequencies. Furthermore the attachment of a device to the listener's body might decrease the feeling of immersion as the listener feels constricted. Besides this for multiuser application it is a visual disturbance and lastly wearing headphones might become uncomfortable over time. Considering

these aspects a loudspeaker based solution is investigated. This paper proposes an idea to use the limited human perception of different time sections of a RIR to symbiotically combine different reproduction techniques to benefit of their strengths while compensating their weaknesses.

## 2. STATE OF THE ART

Nowadays RIRs for virtual reality applications are synthesized using computer generated models. Two different methods can be applied to calculate the data. The first one is the deterministic image source model that delivers exact information about time, magnitude and direction of incoming reflections. The time needed to calculate reflections with this method increases exponentially with the number of reflections and the complexity of the room geometry [1]. A stochastic and less accurate method is the ray tracing approach. It allows for a stochastic determination of the incoming reflections in time and direction and requires less calculation time. Modern room acoustic simulation software uses a hybrid approach of both techniques, the image source model for early reflections and the ray tracing approach for later arriving reflections.

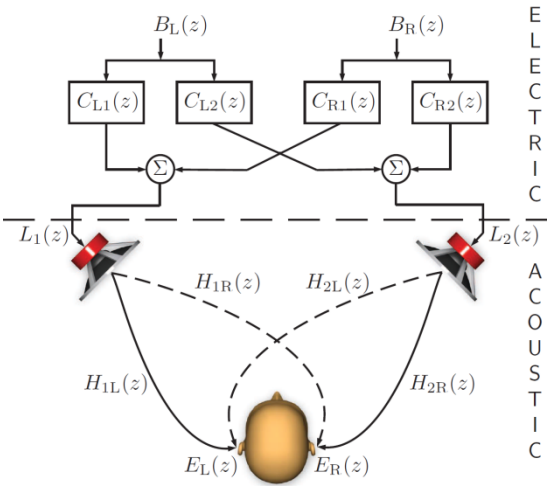



*Figure 1: Concept of CTC. The binaural input **B** is processed with filters **C** to the loudspeaker signals **L**. The signal then arrives the listeners ears over the transfer paths **H** where dotted lines should be cancelled out. For ideal conditions the ear signals **E** are time shifted version of the binaural input **B**. Figure taken from [5].*

Crosstalk Cancellation is a binaural reproduction technique invented by Schroeder and Atal [2]. Input signals are synthesized or recorded using the ear canal signals of an artificial head. Binaural reproduction then aims at presenting a stimulus at the listeners' ears and therefore requires a good channel separation of the two input signals between the left and the right ear. To avoid crosstalk, loudspeakers near the contralateral ear will play cancellation signals that remove the crosstalk however producing new crosstalk at a lower level at the ipsilateral ear. The aim is to eliminate all crosstalk and to produce a so called virtual headphone that allows for sufficient channel separation between both ears to present the binaural signal. This technique is able to reproduce sources in any direction and at any distance.

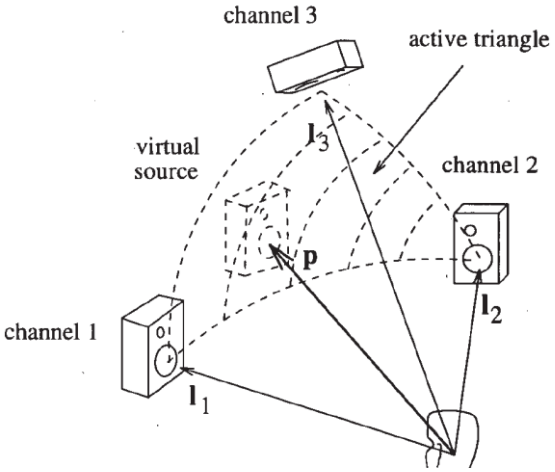



*Figure 2: Principle of VBAP. The loudspeaker vectors **l** are used to create the source vector **p**.*

Vector-base amplitude panning (VBAP) is the extension of the two loudspeaker stereo principle to a triangle and building a sphere with these triangles. Pulkki [4] invented VBAP on the principle of source summation using intensity panning. Virtual sources in any directions can be presented to a listener seated in this sphere. Information about distance can only be indicated by changes in sound pressure levels.

Ambisonics is a physical sound field reproduction technique invented by Gerzon [6]. The sound field at a specific point is either recorded with a special microphone or synthesized. It is then approximated using real-valued spherical harmonics. The spherical harmonics coefficients are then broadcasted and can be played back using the inverse of the spherical harmonics decomposition of the loudspeaker set-up. To enhance the sweet spot and to compensate for the listener that interferes with the sound field, different decoding strategies exist [7] which bring Ambisonics closer to intensity panning techniques. For the so called plane wave Ambisonics different source distances can only be indicated by a change of sound pressure level.

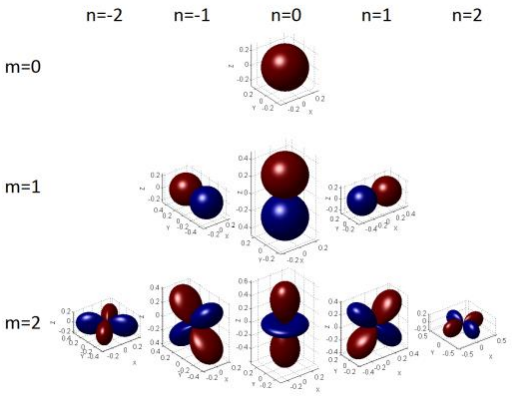



*Figure 3: Real valued spherical harmonics basefunctions up to a truncation order of 2 as part of 2nd order Ambisonics.*

Wave-field synthesis is based on the Huygens-Fresnel principle which states that each point of a propagating wave is the origin of new point source. These point sources are represented by loudspeakers which then reproduce the original wave front. The idea was depicted by Berkhout and de Vries [14]. While this technique has the advantage of not having a sweet spot, it requires a large number of loudspeakers to avoid spatial aliasing. Even for single user experiences a set-up that covers all spatial directions is unpractical and expensive. Therefore this technique is not considered to be part of the hybridization at this point of investigation.

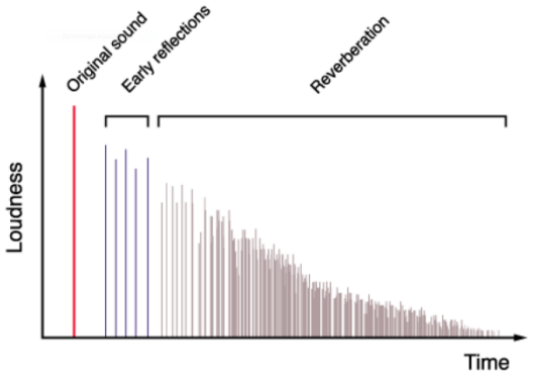



*Figure 4: Separation of a RIR in time by different phases of perception*

## 3. COMBINING REPRODUCTION MODULES

The human auditory system is limited in its perception of different cues of a RIR. The direct sound delivers information about position of the source. Early reflections contribute to the impression of loudness and size of the source [1]. The perception of reverberance and envelopment is mostly provided by reflections arriving after a certain transition time after which the reflections are considered to be diffuse [10] [11].

| Reproduction technique | Strengths | Weaknesses |
|---|---|---|
| Transaural | Precise and easy localization<br>Good readability | Poor realism and lack of immersion/envelopment |
| Ambisonics | Strong immersion and envelopment | Poor localization readability |
| Stereo / Panpot | Very precise localization | Lack of immersion/envelopment |

*Figure 5: Characteristics of different reproduction techniques. Taken from [13]*

Spatial Audio reproduction techniques have different strengths and weaknesses. Gustavino et al. [13] showed that the weaknesses and strengths between Ambisonics and the other two

techniques are inverted. The findings shown in *Figure 5* illustrate that Ambisonics can provide a feeling of envelopment whereas VBAP and CTC are able to provide good localization. To achieve an optimal reproduction of a RIR the idea is to separate the RIR in time and to find the best suitable reproduction technique for each part of the RIR. As shown in *Figure 5* CTC and VBAP are suggested to provide more exact information of position and size of the sound source than Ambisonics does. Therefore CTC and VBAP are intended to be used for the presentation of direct sound and early reflections to deliver a good impression of position and size of the sound source whereas Ambisonics should be used for the late reverberant tail delivering a more authentic impression of listener envelopment and reverberance. The weaknesses of the reproduction techniques can be suppressed as they are not used for the other RIR parts. For this purpose, it is also convenient that the transition time between early reflections and late reverberation matches the time of the last audible image sources (e.g., for order 2) and the beginning of ray tracing results, as shown by Pelzer [3]. The results gathered by the used room acoustic software RAVEN [17] can be fetched separately and then directly be post processed. To ensure an inaudible transition between different reproduction techniques the time of arrival and the loudness of the different reproduction techniques have to be matched.

## 4. LISTENING TEST

The idea of combining different reproduction techniques aims at preserving the good localization properties of one reproduction technique while enhancing the impression of envelopment and reverberance using another technique. To investigate if localization performance and envelopment changes by combining techniques a listening test was conducted. CTC was implemented as a two loudspeaker CTC with simple regularization and windowing as described in [5]. Plane wave Ambisonics with a truncation order of four was implemented and decoded with $|r_e|$-*max* [7] decoding. Additionally two virtual loudspeakers below and above the listener where added to improve stability of the Ambisonics system. VBAP was implemented in its original formulation. Further detailed information about the listening test can be found in [8].

### 4.1 SET-UP

The listening test was held in an anechoic chamber with 24 loudspeakers which were set up in three horizontal rings with eight loudspeakers each. The approximate distance of each loudspeaker to the listener was about $1.7m$, with loudspeakers pointing towards the listener, one loudspeaker in direct frontal direction (azimuth $= 0°$) for each ring, spacing of $45°$ in azimuth and $30°$ in elevation, as shown in *Figure 6*. To optimize the pointing accuracy for the localization test a head mounted display was used, as suggested by Majdak [12]. The view inside the HMD (Oculus Rift DK1) was a sphere with a



*Figure 6: Listening test set-up and view in the HMD*

grid, illustrated in the bottom right corner of *Figure 6*. The own view direction was indicated by a red dot and the head rotation by four grey dots around the red dot. The front direction was indicated by a yellow dot in the grid. Playback was only enabled when the test subject was looking in front direction with no head rotation, i.e. the red dot was congruent with the yellow dot and the grey dots where on the grid. To avoid motion sickness and to ease orientation in the real world a fixed chair with arm-rests was used. The chair set-up and the loudspeaker set-up limited the virtual source positioning to the frontal directions as the subjects could not easily turn their head further than $\pm 80°$ in azimuth and as the loudspeaker set-up became unfavorable for source positions elevated further than $\pm 30°$ for Ambisonics and VBAP.

As virtual room a model of the Concertgebouw Amsterdam was used. The listener was positioned in the middle of the room, near the first row of the audience. To ensure an influence of the late reverberation tail on the perceived sound a source distance of $5.5m$ was chosen which matches the critical distance in the room. The four selected directions of the sources can be found in *Figure 7*. This figure also illustrates the source position in relation to the loudspeaker array. As Signal pink noise bursts were used. The playback could be repeated as often as desired.

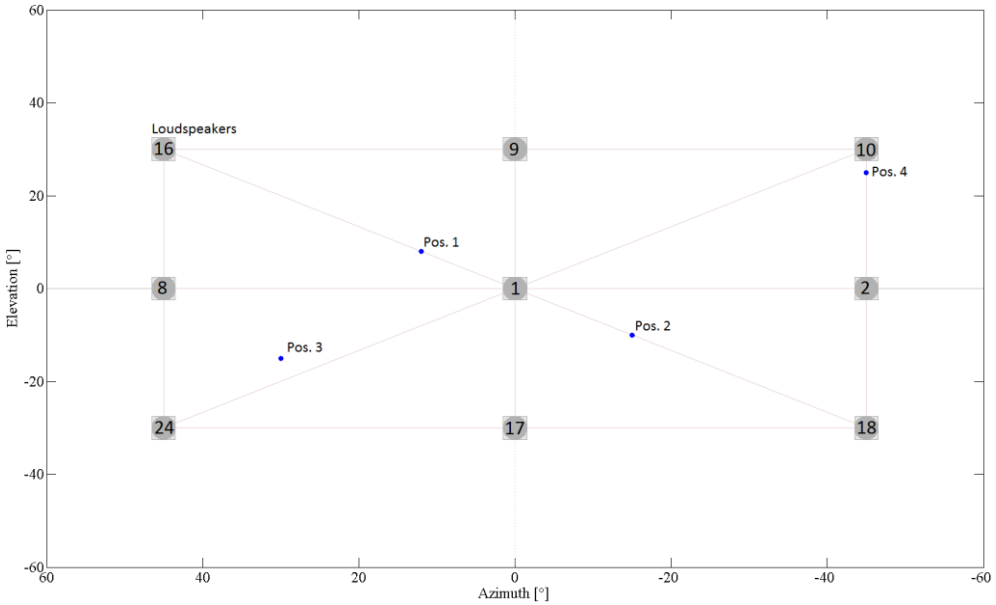



*Figure 7: Directions of the source positions and frontal loudspeakers from the view of the listener*

### 4.2 PROCEDURE

18 persons, including 7 acousticians, participated in the listening test. The five different reproduction techniques tested were Ambisonics, VBAP and CTC and a combination of CTC for early reflections (image source order of three) with Ambisonics for the late reverberant tail, and in the same way a combination of VBAP with Ambisonics. At first the participants were asked to rate the immersion of the three pure reproduction techniques in a 2-AFC. The definition of immersion was given as “feeling surrounded by the sound and being able to feel like ‘you are in a different room’ than the one you are seated in”. This part was done without the HMD.

Next the participants were set up with the HMD and had to proceed through a training phase in which single loudspeaker played pink noise bursts and were visualized in the HMD. The participants then had to point at the visualized loudspeaker and push a button to confirm their

selected direction. This way the participants could get used to the situation of being in the virtual world and familiarize with the operation. After the training phase the stimuli were played back using the five different reproduction techniques. In comparison to the training phase, no visualization of the sound source loudspeaker was used. Due to problems with the horizontal tracking of the HMD the subjects had to adjust the front direction before every sample by pointing the HMD to the loudspeaker in direct frontal direction which was playing pink noise bursts.

### 4.3 RESULTS AND DISCUSSION

The immersion test showed no significant difference between the reproduction techniques. Most participants stated that they had no specific idea of what immersion means. The formulation clearly was too vague and the assumption holds that participants changed the criteria they used to evaluate immersion during the test.

To investigate the immersion of the reproduction techniques more profoundly, a questionnaire is currently being developed and validated. This questionnaire contains a set of items addressing different aspects of the spatial audio reproduction such as envelopment, source localization or the room perception. The selection of items aspects is based on existing inventories of spatial audio attributes [15, 16]. The usage of this questionnaire will lead to a more detailed measurement of the immersion of the different reproduction methods.

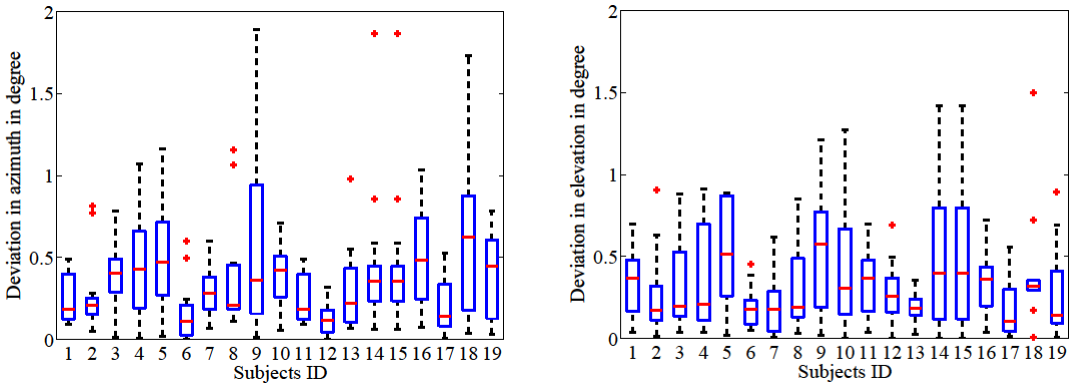



*Figure 8: Pointing accuracy during training phase*

In the localization experiment, the HMD as the pointing device resulted in a good performance. Both in azimuth and elevation the deviation was below 1°. Only two subjects complained about a slight feeling of motion sickness after finishing the listening test.

The localization test showed that the performance of the single reproduction techniques depends on the position of the virtual source in relation to the loudspeaker array as shown in *Figure 9*. The overall performance between the systems results no significant difference. For the CTC technique a more homogeneous localization can be found whereas Ambisonics and VBAP provide localization based on the relation of virtual source position to loudspeaker array.

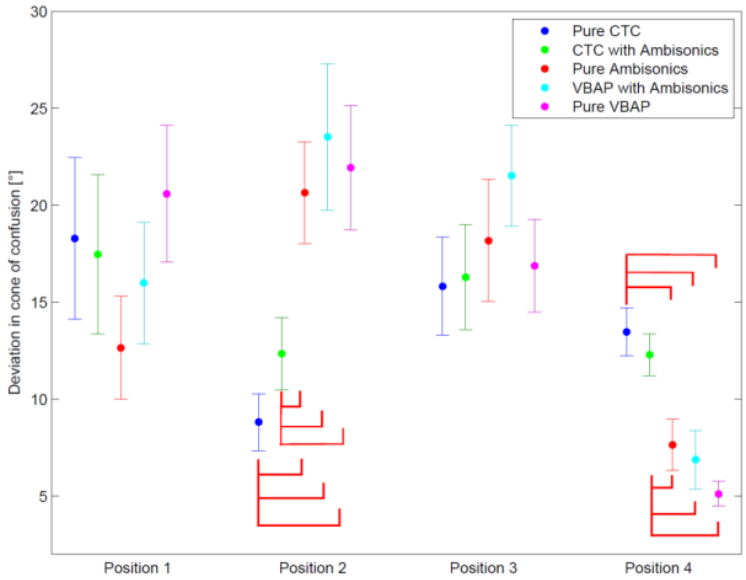



*Figure 9: SPSS analysis of the localization test. The results depend on the position of the source in relation to the loudspeakers. No significant difference between pure and combined reproduction techniques can be found.*

## 5. CONCLUSIONS AND OUTLOOK

The presented idea is a promising way to improve reproduction of spatial audio for room acoustic simulations and virtual reality purposes by including knowledge of the difference in perception of different sections in a RIR.

The listening test showed that no significant differences between pure reproduction methods and combined ones exist regarding localization performance. Proving the enhancement failed which is assumed to be founded in the listening test design. Further listening tests are currently being prepared to investigate the impression of envelopment and reverberance and to find a suitable way of measuring the immersion of spatial reproduction techniques.

The results of the listening test indicate that the localization performance depends on the loudspeaker array and the position of the virtual source in relation to the loudspeaker array. This relation should be investigated to find optimal solutions for the hybridization process.

Furthermore the listening test showed that a HMD can improve pointing accuracy and that participants can handle the device without problems. It should be noted that the used HMD, Oculus Rift DK1, is an outdated version and that motion sickness, pointing accuracy and usability can be expected to be enhanced in current versions of the HMD.

## 6. REFERENCES

[1] VORLÄNDER, M. Auralization, 2008, Springer Verlag
[2] Schroeder, M. R., Atal, B. S. "Computer Simulation of Sound Transmission in Rooms," IEEE Conv. Rec., 150-155 (1963)
[3] PELZER, S., MASIERO, B., AND VORLÄNDER, M., 3D Reproduction of Room Acoustics using a Hybrid System of Combined Crosstalk Cancellation and Ambisonics Playback. 2011.
[4] PULKKI, V. Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. Journal of the AES, 45(6):456–466, 1997.
[5] MASIERO, B. Individualized Binaural Technology: Measurement, Equalization and Perceptual Evaluation. Ph.D. thesis, RWTH
[6] GERZON, M. A. Periphony: With-height sound reproduction. Journal of the Audio Engineering Society, 21(1):2–10, 1973.
[7] DANIEL, J., "Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia," PhD Thesis, Ph. D. Thesis, University of Paris VI, France, 2000
[8] KOHNEN, M. 3-D Reproduction of Room Auralizations by Combining Intensity Panning, Crosstalk Cancellation and Ambisonics. Master Thesis, RWTH Aachen University, 2014.
[9] REILLY, A., MCGRATH, D., AND DALENBÄCK, B.-I. Using Auralisation for Creating Animated 3-D Sound Fields Across Multiple Speakers.
[10] MEESAWAT, K. AND HAMMERSHOI, D., editors. The Time When the Reverberation Tail in a Binaural Room Impulse Response Begins, 2003.
[11] LINDAU, A., editor. Perceptual evaluation of physical predictors of the mixing time in binaural room impulse responses. Audio Engineering Society, 2010.
[12] MAJDAK, P., LABACK, B., GOUPELL, M., AND MIHOCIC, M. The Accuracy of Localizing Virtual Sound Sources: Effects of Pointing Method and Visual Environment. 2008.
[13] GUASTAVINO, C., LARCHER, V., CATUSSEAU, G., AND BOUSSARD, P. Spatial Audio Quality Evaluation: Comparing Transaural, Ambisonics and Stereo. 2007.
[14] BERKHOUT, A. J., DE VRIES, D. "Acoustic holography for sound control," in 86th AES Convention, 1989
[15] BERG, J. AND RUMSEY, F., Identification of quality attributes of spatial audio by repertory grid technique. J. Audio Eng. Soc., 54 (5). 365-379, 2006.
[16] LINDAU, A., Binaural resynthesis of acoustical environments: Technology and perceptual evaluation. PhD thesis, Technical University Berlin, 2014.
[17] SCHRÖDER, D. And VORLÄNDER, M., "RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments" in Proceedings of Forum Acusticum 2011 : 27 June - 01 July, Aalborg, Denmark, 2011.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SPHERICAL HARMONICS REPRESENTATION OF THE SOUND FIELD IN A ROOM BASED ON FINITE ELEMENT SIMULATIONS

PACS 43.55.Ka

D. M. Murillo; F. M Fazi; R. J. Astley
Institute of Sound and Vibration Research; University of Southampton
University road, Building 13, SO17 1BJ
Email: dmmg1c12@soton.ac.uk; diegomurillogomez@gmail.com

## ABSTRACT

An inverse technique is presented that generates a spherical harmonics decomposition of the sound field in a room predicted using the Finite Element Method. In this study, a virtual microphone array is created from the calculated pressure field data and it is implemented to estimate a finite set of spherical harmonic coefficients, which provide a local description of the sound field. An analysis is considered of the relation between the size of the virtual array and the maximum order of spherical harmonics coefficients that can be computed with a good level of accuracy. The condition number of the matrix to be inverted and the effects of the Tikhonov regularization used to stabilize the solution are also discussed. The results suggest that the inverse method is a suitable solution for the problem under consideration but the trade-off between the size of the virtual array and the maximum order of the spherical harmonics constrains its applicability.

## RESUMEN

Un método inverso que genera la descomposición en armónicos esféricos del campo sonoro de una sala simulada por medio de elementos finitos es presentado. En este estudio, un arreglo virtual de micrófonos es sintetizado a partir de la información simulada de presión acústica y es implementado para estimar un set finito de coeficientes de armónicos esféricos que proveen una descripción local de campo sonoro. La relación entre el tamaño del arreglo virtual de micrófonos y el máximo orden de coeficientes de armónicos esféricos que pueden ser estimados con buen nivel de precisión es discutida. En adición, el número de condición de la matriz a invertir y los efectos de implementar regularización Tikhonov para estabilizar la solución también son estudiados. Los resultados indican que el uso del método inverso es una técnica adecuada para el problema bajo estudio, sin embargo, la relación entre el tamaño del arreglo virtual y el máximo orden de armónicos esféricos limitan su aplicabilidad.

## 1. INTRODUCTION

Spherical harmonics are orthonormal functions whose weighted superposition allows to generate a local description of the sound field in bounded and unbounded spaces. The acoustic pressure at the field point $\mathbf{r}$ can be expanded in a series representation using spherical harmonics as [1]

$$p(r,\theta,\varphi,\omega) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} A_{nm}(\omega) j_n(kr) Y_n^m(\theta,\varphi)\,, \tag{1}$$

where $A_{nm}$ are complex coefficients, $j_n$ are the spherical Bessel functions of the first kind of order $n$ and $Y_n^m$ are the spherical harmonics defined as [1]

$$Y_n^m(\theta,\varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)}{4\pi}\frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) e^{jm\varphi}\,, \tag{2}$$

in which $P_n^m$ is the Legendre associated function and $j$ is the imaginary unit. Equation (1) describes the interior case, which requires that the acoustic sources lie outside of the reconstruction area. Any sound field satisfying the Helmholtz equation can be exactly represented by means of spherical harmonics, however, the truncation of the series to a finite order $N$ constrains the area and frequency upon which the representation is accurate. For the case of a plane wave propagation, the relation between the truncation order of spherical harmonics $N$, the area of reconstruction $r$ and wavelength $\lambda$ is given by [2]

$$N = \left\lceil e\pi\frac{r}{\lambda}\right\rceil, \tag{3}$$

where $e$ is Euler's number. The relation given in equation (3) is commonly approximated to ($N = kr$) [3] [4], in which $k$ is the wave number.

The Finite Element Method (FEM) is a well-established technique to obtain a numerical solution of the wave equation in complex cases where an analytical solution is not achievable. For this, the Helmholtz equation is expressed in its discretized integral form (weak formulation) leading to a system of algebraic equations which can be solved by computers [5]. The main advantage of the FEM lies in the accuracy of the results compared to other room acoustic simulation methods (e.g. Geometrical Acoustics). Nevertheless, the output data of acoustic pressures does not have associated directional information, which constrains its use for multichannel audio reproduction applications.

An approach to obtain a spherical harmonics representation of sound fields that have been predicted using FEM is presented in the current work. In specific, the implementation of an inverse method for that purpose has been addressed. For this, a virtual microphone array has been created using the acoustic pressure data obtained in FEM and it is used to estimate a set of spherical harmonics coefficients, which provide a local description of the sound field. Evaluation of the proposed method in terms of accuracy in the sound field reconstruction is presented on the basis of the size of the array, order of spherical harmonics and condition number of the spherical harmonics matrix. Alternative approaches can be found in the scientific literature based on the description of the sound field as a superposition of plane waves [6] or using time domain methods for the numerical solution of the wave equation [7].

The remaining sections of the paper are as follows: section 2 reviews the theoretical basis of the inverse approach. Methods to evaluate the effects of the different parameters involved in the inversion are addressed in section 3. Results and their discussion are presented in section 4. Finally, the conclusions of the current work are reported in section 5.

## 2. THEORETICAL BASIS

The acoustic pressure estimated from FEM at a specific field point can be associated to the output signal of an omnidirectional microphone (in the frequency domain). The combination of different field points generates a virtual microphone array which can be used to extract directional information of the sound field. Then, a set of spherical harmonics coefficients is used to reconstruct the acoustic pressure at the array position. The complex coefficients $A_{nm}$ are determined by the inversion of equation (1). The basic principle is as follows: the complex acoustic pressure at *L* virtual microphone positions are denoted using vector notation as

$$\mathbf{p} = [p_1, p_l \cdots, p_L]^T , \tag{4}$$

in which $p_l$ is the acoustic pressure at the $l$-th virtual microphone. Likewise, the complex coefficients $A_{nm}$ used to decompose the sound field are represented by the vector

$$\mathbf{a} = \left[A_{\nu(1)\mu(1)}, A_{\nu(s)\mu(s)} \cdots, A_{\nu(S)\mu(S)}\right]^T , \tag{5}$$

where $\nu(s) = \lceil\sqrt{s} - 1\rceil$ and $\mu(s) = s - 1 - \nu - \nu^2$. $\lceil\cdot\rceil$ corresponds to ceiling round. Finally, the transfer function that describes the relation between each complex coefficients $A_{nm}$ and each virtual microphone $j_n(kr)Y_n^m(\theta, \varphi)$ can be arranged in matrix notation as

$$\mathbf{Y} = \begin{vmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1S} \\ \vdots & y_{ls} & \vdots \\ y_{L1} & \cdots & y_{LS} \end{vmatrix}, \tag{6}$$

in which $y_{ls} = j_\nu(kr_l)Y_{\nu\mu}(\theta_l, \varphi_l)$. Consequently, the relationship between the complex coefficients and the virtual microphones is described using matrix notation as follows:

$$\mathbf{p} = \mathbf{Y}\mathbf{a} . \tag{7}$$

The complex coefficients $A_{nm}$ are calculated solving equation (7) for $\mathbf{a}$. In the current instance an overdetermined case is implemented, which means that there are more microphones than complex coefficients. The result is obtained in terms of least-squares solution minimizing the sum of the squared errors between the reconstructed and the target sound field [8]. The error vector can be expressed as:

$$\mathbf{e} = \tilde{\mathbf{p}} - \mathbf{p} , \tag{8}$$

where $\tilde{\mathbf{p}}$ is the vector of reconstructed acoustic pressures and $\mathbf{p}$ is the vector of acoustic pressures from the virtual microphone array. The least squares solution is achieved by the minimization of a cost function $J = \mathbf{e}^H\mathbf{e}$ where $H$ indicates the Hermitian transpose. The minimization of the cost function $J$ is given by [8]

$$\mathbf{a} = \mathbf{Y}^\dagger\mathbf{p} , \tag{9}$$

in which $\mathbf{Y}^\dagger$ is the Moore–Penrose pseudoinverse of the matrix $\mathbf{Y}$ [8].

## 3. METHODS

A preliminary analysis was performed in Matlab to determine the influence of the size of the microphone array and the order of spherical required to generate an inverse matrix whose condition number does not compound higher than a 6th order of magnitude. The condition number is defined as the ratio between the largest and the smallest singular value of the propagation matrix $\mathbf{Y}$. It has been shown in [8] that the sensitivity of the solution provided by the inverse method is determined by the condition number. Firstly, a simple incoming plane wave of 63 Hz ($\theta = 90, \varphi = 45$) in free field was selected as a target. The sound field was simulated and captured by a virtual array (cube shape) of linear dimensions of 0.8, 1.2, 1.6 and 2 m with a

spatial resolution of 0.1m. Table 1 shows the condition number for different sizes of array and order of spherical harmonics.

Table 1. Condition number of the inverted matrix for different order of spherical harmonics and size of the microphone array.

| | | **Order of Spherical Harmonics (*N*)** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| **Array (m)** | 0.8 | 2.54E+05 | 6.97E+06 | 1.49E+08 | 4.74E+09 | 1.49E+11 | 7.41E+12 | 6.06E+20 |
| | 1.2 | 3.63E+04 | 6.54E+05 | 9.56E+06 | 1.96E+08 | 4.17E+09 | 1.23E+11 | 2.82E+12 |
| | 1.6 | 8.82E+03 | 1.19E+05 | 1.32E+06 | 2.03E+07 | 3.27E+08 | 7.04E+09 | 1.24E+11 |
| | 2 | 2.86E+03 | 3.09E+04 | 2.77E+05 | 3.39E+06 | 4.40E+07 | 7.51E+08 | 1.07E+10 |

As expected, the condition number decreases as the size of the array increases. The reason is because the wavelength of the target wave is approximately 5.4 m and a larger array captures more information of the propagation, which in turn, improves the matrix inversion. However, regarding the order of Spherical Harmonics, the condition number increases with the order. Based on equation (3), a low order is required to reconstruct the sound field in the array´s area. Spherical Harmonics coefficients that are not needed to represent the sound field at 63 Hz over the area of the array are being calculated which leads to constrain the solution. A configuration of order 7 and a microphone array of 1.6 m of length (spatial resolution of 0.2 m), which provides a radius of accurate reconstruction of approximately 0.6 m when the inversion is carried out up to the 447 Hz was selected for the simulations.

3.1 Sound field reconstruction

Based on the previous configuration, a spherical wave propagation was synthesized in a virtual anechoic room of 5m × 10m ×3 m. Samples of the sound fields were extracted using a cubic virtual microphone array composed by 792 transducers (9 × 9 × 9) and were used to estimate the set of complex spherical harmonics coefficients of order 7. Figures 1 to 4 show the sound field reconstruction and acoustic pressure errors for two array´s position. The black square represents the position of the microphone array, the white contour in Figure 3 and 4 identifies the region within which the normalized error is lower than -20 dB, and the black circle represents the area of accurate reconstruction based on equation (3). Three error metrics were taken into account to evaluate the reconstructed sound field:

Amplitude error:

$$e_a = 10\log_{10}\left(\frac{|\tilde{p}|}{|p|}\right). \tag{10}$$

Phase error:

$$e_p = \angle\left(\frac{p\tilde{p}^*}{|p||\tilde{p}|}\right), \tag{11}$$

Normalized error:

$$e_n = 10\log_{10}\left(\frac{|p-\tilde{p}|^2}{|p|^2}\right), \tag{12}$$

where $\tilde{p}$ is the reconstructed pressure, $p$ is the target pressure and $*$ indicates the conjugate of the function.

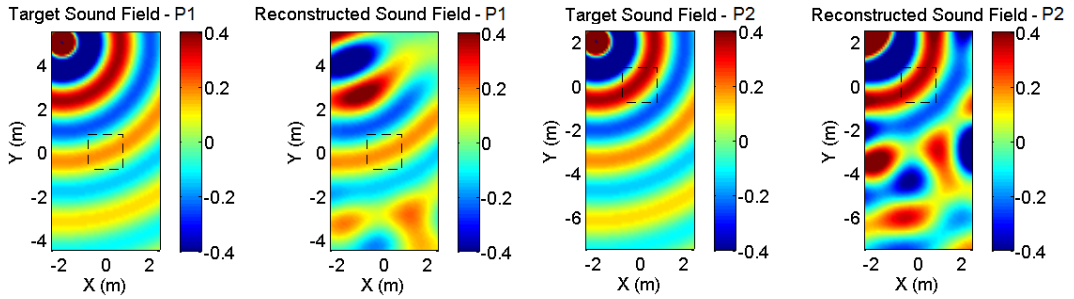



Figure 1. Target and reconstructed sound field for spherical wave propagation of 125 Hz. Two positions of the array are illustrated.

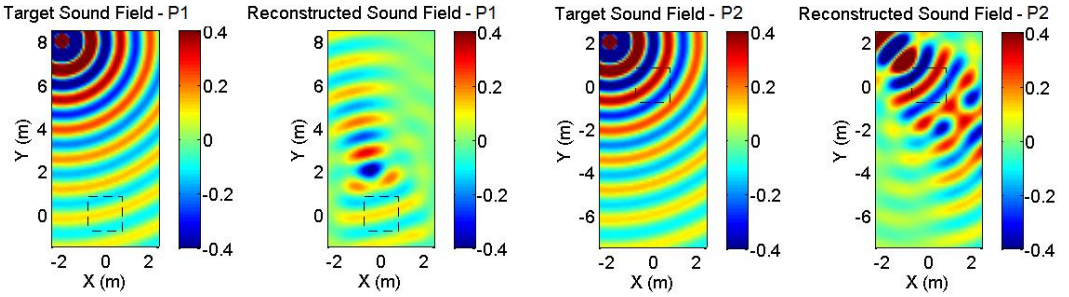



Figure 2. Target and reconstructed sound field for spherical wave propagation of 250 Hz. Two positions of the array are illustrated.

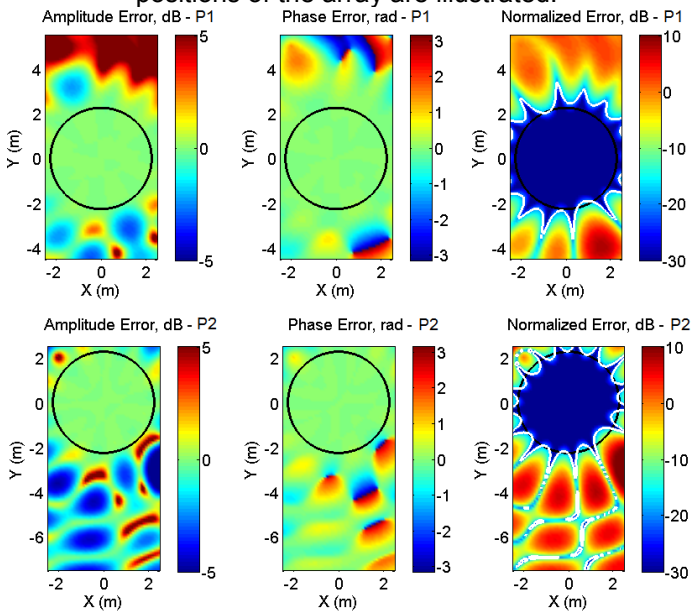



Figure 3. Amplitude, phase and normalized errors for spherical wave propagation of 125 Hz. Position 1 is illustrated at top and position 2 in bottom.

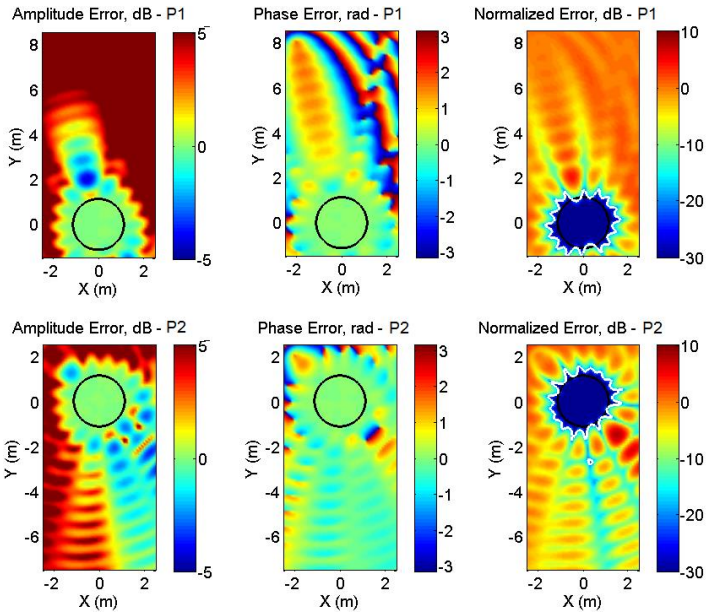



Figure 4. Amplitude, phase and normalized errors for spherical (SW) wave propagation of 250 Hz. Position 1 is illustrated at top and position 2 in bottom.

Previous figures indicate that, as expected, the area over which the reconstruction is accurate depends on frequency and is wider at lower frequencies. A comparison of the normalized errors shows good agreement between the area where the error is less than -20 dB and the radius predicted by equation (3) regardless of the position of the array. However, this relation remains as long as the predicted radius does not include the acoustic source. If that does happen, the area of accurate reconstruction shrinks to an extent that depends on the distance of the source. Similar results were found for the amplitude and phase errors.

3.3 Regularization of the inversion

A comparison between the sum of the absolute value of the $Anm$ coefficients squared for each order $n$ predicted by the inverse method and those calculated analytically is presented in figure 5 for the two array positions (125 Hz case). The analytical $Anm$ coefficients are calculated from the following equation [1]

$$\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} = -jk\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} j_n(kr)h_n^{(2)}(kr')Y_n^m(\theta_r,\varphi_r)Y_n^m(\theta_{r'},\varphi_{r'})^*\,, \tag{13}$$

in which $\mathbf{r}$ and $\mathbf{r}'$ are the receiver and source locations, respectively and $h_n^{(2)}$ is the spherical Hankel function of second kind.

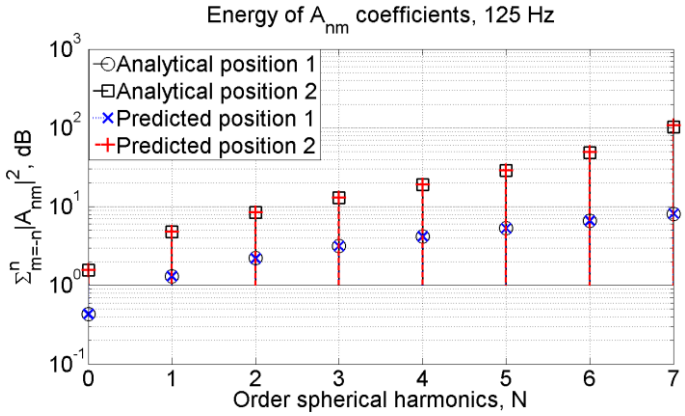



Figure 5. Comparison of the Energy of the $Anm$ coefficients per order.

Figure 5 indicates that the inverse method is able to estimate with high accuracy the total energy of the $Anm$ coefficients per order. A small mismatch was found for the last order in the array position 2, which can be attributed to numerical errors. Nevertheless, Figures 1 shows zones with high acoustic pressure values in the overall environtment for the case of the array located closer to the source. This suggests that an important amount of energy from the higher orders is used to reconstruct the sound field outside of the radius of reconstruction.

A well established technique to optimize solutions obtained by inverse methods is the use of a regularization parameter in the inversion of the propagation matrix $\mathbf{Y}$ [8-10]. Tikhonov regularization is based on the concept of changing the cost function $J$ by the inclusion of an additional term [8], namely

$$J = \mathbf{e}^H\mathbf{e} + \beta\mathbf{q}^H\mathbf{q}\,, \tag{13}$$

where $\beta$ is the regularization parameter whose value usually compounds between $\|\mathbf{H}\|^2/1000$ and $\|\mathbf{H}\|^2/5000$ [6].$\|\mathbf{H}\|$ corresponds to the norm of the spherical harmonics matrix $\mathbf{H}$. The minimization of the cost function $J$ established in equation (13) is given by

$$\mathbf{q} = [\mathbf{Y}^H\mathbf{Y} + \beta]^{-1}\mathbf{Y}^H\mathbf{p}\,. \tag{14}$$

Equation (14) indicates that the minimization of the cost function accounts for the sum of the squared errors between the reconstructed and target acoustic pressure but also for the sum of the squared sperhical harmonic coefficients. Figure 6 illustrates the reconstructed sound field and the acoustic errors for 125 Hz and the array located at position 2, but with Tikhnonov regularization. The case of 250 Hz is not illustrated because the regularization has does not have a significant effect at this frequency. A comparison in terms of the energy of the $Anm$ coefficients is shown in Figure 7.

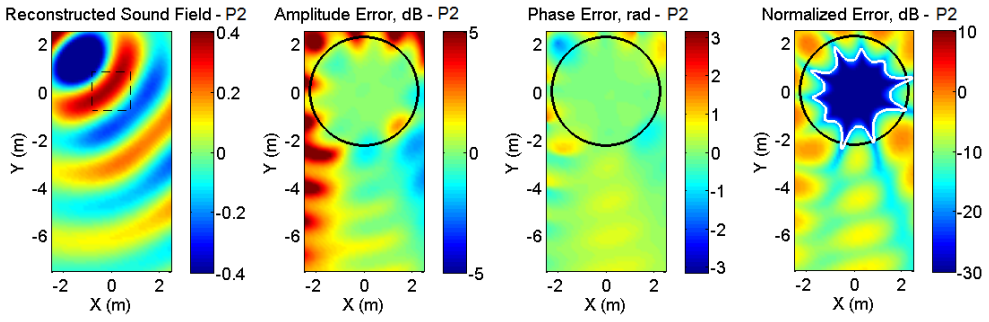



Figure 6. Reconstructed sound field; amplitude, phase and normalized errors for spherical wave propagation of 125 Hz. Array located at position 2. Regularized case.

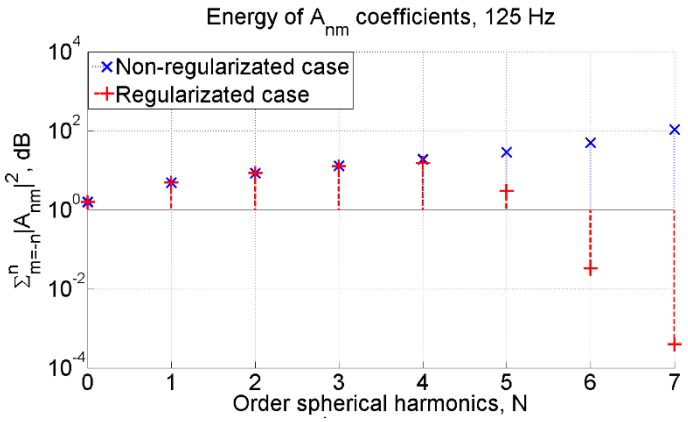



Figure 7. Energy of the $Anm$ coefficients per order. Blue colour indicates non-regularized case and red colour the regularized case.

The outcomes suggest that the implementation of Tikhnonov regularization drastically reduce the energy of the highest orders, but at the expense of reducing the radius of reconstruction from 2.5 m to 1.2 m aproximately. However, a comparison between the normalised error (equation 12) averaged over the whole reconstruction region (shown in the figures above) for the non-regularizated and for the regularizated cases indicates that the sound field reconstruction over the whole domain is performed more accurately with regularization. These results point out that the solution with regularization is more efficience in terms of the energy required to synthesize the sound field.Table 2 shows the average normalized acoustic error for the two cases.

Table 2. Average normalized acoustic error for the non-regularized and regularized case.

| Inversion | Normalized error (dB) |
|---|---|
| Non-regularizated | 18.0 |
| Regularized | 11.1 |

## 4. APPLICATION OF THE METHOD TO THE SOUND FIELD IN A ROOM

The same approach discussed in section 3 has been applied to a FEM model of an enclosure with an aproximate volume of 88 $m^3$. Figure 9 shows an isometric and a top view of the enclosure. The predicted frequency responses of the room has been compared with measured data based on the guidelines established in the ISO 3382-2 [11] to verifiy their reability. The simulations have been carried out with the following configuration: The acoustic source corresponds a monopole source. The boundaries of the domain are assumed to be locally reacting and the specific acoustic impedance values have been calculated using the measurements of the reverberation time and the Eyring equation. The geometric model of the room contains all the details that are not much smaller than the shortest wavelength predicted.

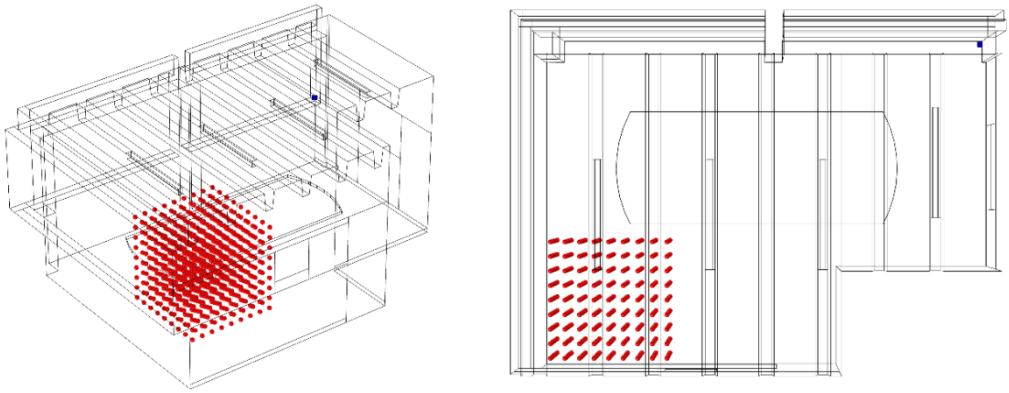


Figure 9. FEM model of a meeting room. Red circles represent the position of the virtual microphone array and the blue square the position of the acoustic source.

Figures 10 and 11 show the sound field reconstruction and the acoustic pressure errors for 63 Hz and 250 Hz based on the configuration given in Figure 9. Again, the inclusion of regularization reduces in a significant proportion the energy of highest orders as shown in Figure 12.

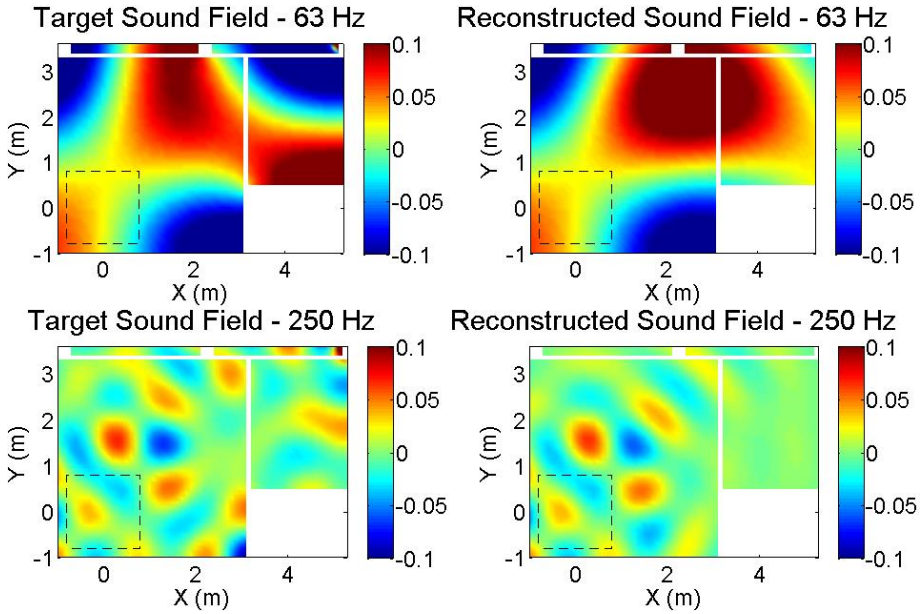



Figure 10. Target and reconstructed sound field based on FEM simulations. Top figures corresponds to 63 Hz and bottom to 250 Hz case. Acoustic pressure at 1.5 m height.

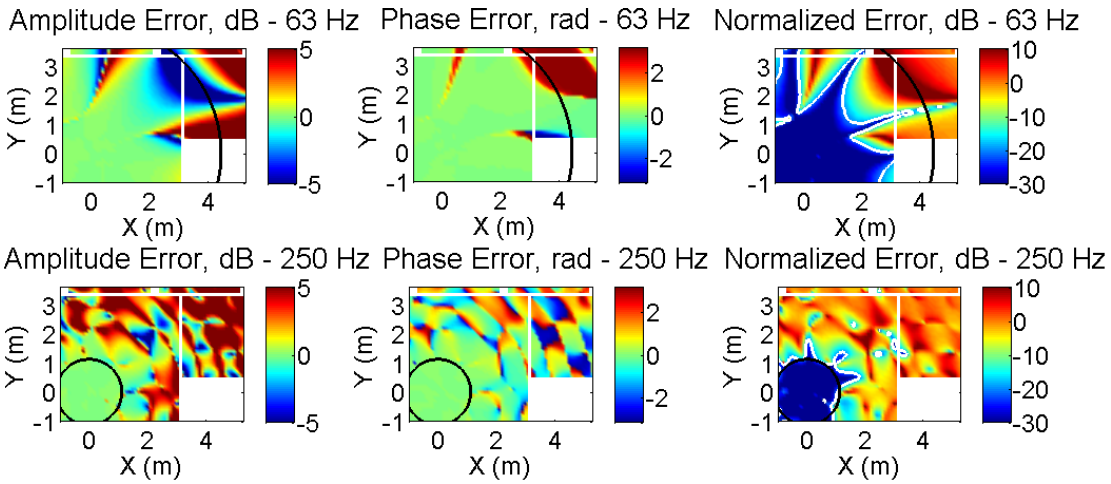



Figure 11. Amplitude, phase and normalized errors. Top figures corresponds to 63 Hz and bottom to 250 Hz case. Errors at 1.5 m height.

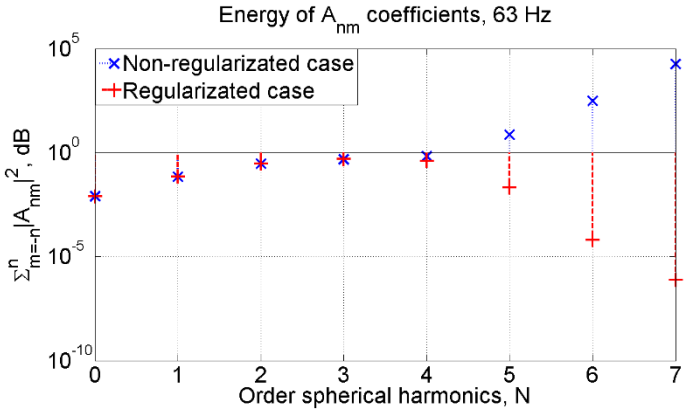



Figure 12. Energy of the $Anm$ coefficients per order based on FEM simulations. Blue colour indicates non-regularized case and red colour the regularized case.

Results indicate that the proposed inverse method is a suitable technique to decompose the sound field in spherical harmonics. In congruence with the previous findings, the radius where the reconstruction is accurate (based on equation 3) shows good agreement only in the case of 250 Hz, for 63 Hz, the area is overestimated. This condition is related to the presence of the walls. The homogeneous Helmholtz equation is not satisfied in the whole interior region (circle) due to the boundaries, which plays in this sense a similar role as acoustic sources.

Regarding regularization, its inclusion reduces the energy of the highest orders. Although its implementation shrinks the area over the the reconstruction is accurate, for this specific case the radius at 63 Hz is approximately 1 m, which allows for a local description of the sound field. Nevertheless, the dimension of the array for low frequency applications is significant (1.6 m for this case), which represents a constrains to the implementation of this method in case of small rooms. The requirement to locate the array in a position where no scattering objects are present inside the array also impose a limitation.

One of the advantages of generating a local description of FEM simulated data based on spherical harmonics lies in the straightforward Auralization of the data using a High Order Ambisonics sound reproduction system and the manipulation of the sound field (for example rotation) for interactive aplications. The rotation of the sound field in the Azimuth plane can be easy computed by

$$p(r,\theta,\varphi_{rot},\omega) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} A_{nm\varphi_{rot}}(\omega) j_n Y_n^m(\theta,\varphi)\,, \tag{15}$$

where

$$A_{nm\varphi_{rot}}(\omega) = A_{nm}(\omega) e^{-jm\varphi_{rot}}\,. \tag{16}$$

## 5. CONCLUSIONS

A spherical harmonics representation of sound fields simulated using FEM has been presented. The approach implements an inverse method to decompose the soud field based on a virtual microphone array.

The trade-off between the size of the virtual microphone array and the order of spherical harmonics have been analysed in terms of the condition number of the matrix to be inverted. The condition number is reduced when the size of the array is increased and the order of the spherical harmonics is decreased. The selection of these two parameters have to be made according to the frequency range and the area where the sound field reconstruction is intended to be accurate.

The use of Tikhonov regularization to optimize the inversion of the propagation matrix has been also investigated. The results indicated that its implementation reduces the reconstruction area where the normalized error is below -20 dB, but decreasing the average normalized error over the whole domain. In addition, the energy required by the coefficients to reconstruct the sound field is lower when regularization is applied.

## REFERENCES

[1] E. Williams. Fourier Acoustics. Academic Press, London, 1st edition, 1999.

[2] R. Kennedy; P. Sadeghi; T. Abhayapala and H. Jones. Intrinsic Limits of Dimensionality and Richness in Random Multipath Fields. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(6):2542–2556, 2007.

[3] D Murillo, F Fazi, and M Shin. Evaluation of Ambisonics Decoding Methods with Experimental Measurements. *In EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics 2014*, April, pages 1–9, Berlin, 2014.

[4] M Poletti. Three-Dimensional Surround Sound Systems Based on Spherical Harmonics. *Journal of the Audio Engineering Society*, 53(11):1004–1025, 2005.

[5] J. Astley. Numerical Acoustical Modeling (Finite Element Modeling). In J. Malcom, editor, *Handbook of Noise and Vibration Control*, chapter 7, pages 101115. John Wiley & Sons, New Jersey, 1st edition, 2007.

[6] B. Støfringsdal and P. Svensson. Conversion of Discretely Sampled Sound Field Data to Auralization Formats. *Journal of the Audio Engineering Society*, 54 (5):380–400, 2006.

[7] A. Southern, D. Murphy and L. Savioja. Spatial Encoding of Finite Difference Time Domain Acoustic Models for Auralization. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 20 (9):2420–2432, 2012.

[8] P. Nelson and S. Yoon. Estimation of Acoustic Source Strength by Inverse Methods: Part I, Conditioning of the Inverse Problem. *Journal of Sound and Vibration*, 233(4):639–664, 2000.

[9] Y. Kim and P. Nelson. Optimal Regularisation for Acoustic Source Reconstruction by Inverse Methods. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5):463–487, 2004.

[10] S. Yoon and P. Nelson. Estimation of Acoustic Source Strength by Inverse Methods: Part II, Experimental Investigation of Methods for Choosing Regularization Parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 233(4):665–701, 2000.

[11] International Organization for Standardization. ISO 3382 part 2, Acoustics- Measurement of Room Acoustic Parameters, Reverberation Time in Ordinary Rooms, 2009

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015
46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# LISTENER TRACKING STEREO FOR OBJECT BASED AUDIO REPRODUCTION

Marcos Felipe Simón Gálvez
M.F.Simon-Galvez@soton.ac.uk
Dylan Menzies
Filippo Maria Fazi
Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK

Teofilo de Campos
Adrian Hilton
Centre for Vision, Speech and Signal Processing, University of Surrey, UK

## ABSTRACT

This paper introduces a method to provide accurate localisation of audio objects with a stereo reproduction system when the listener is away from the sweet spot. To this end, a formulation is presented which allows to compensate the loudspeaker input feeds so that the soundwaves which propagate from both loudspeakers arrive with the same amplitude and phase independently of the listener position. In order to render audio objects, conventional panning techniques are used, which are also adapted depending on the listener position. The formulation has been implemented in a real time system and an initial set of measurements show that the proposed system is able to pan different objects accurately inside the loudspeaker span. The measurements also show that the panning of virtual audio sources outside of the loudspeaker span is limited to spatial positions close to the loudspeakers.

**PACS No**:43.38.Vk, 43.60.Fg, 43.66.Lj

## 1 INTRODUCTION

In a stereo reproduction system, the listener, placed in the symmetry axis between the two loudspeakers, i.e., the *sweet spot*, will perceive one or more virtual *phantom source images* located in the span between the two loudspeakers, whose position is adjusted by varying the amplitude or by applying a delay between the signals feeding the two loudspeakers[1]. If the listener, however, moves away from the sweet spot and leans towards one of the loudspeakers, the position of the phantom sources will shift and finally collapse towards the closest loudspeaker, thus compromising the rendering of spatial sound and the initial intention of the sound producer[2]. Nowadays, thanks to the development of computer vision, an accurate estimation of the listener position with respect to that of the loudspeakers can be obtained, which allows to compensate the input loudspeakers feeds, so that the sound waves impinging from both radiators arrive to the listener at the same time and with the same amplitude. An example of this technology is the *Sweetspotter*[3], wherein the stereo loudspeaker feeds are phase compensated to preserve the position of the virtual sources on the original mix.

The approach presented here allows to render audio objects which adapt to the listener position for a maximum spatial immersion. The output of both loudspeakers is first adjusted to the listener position, so that the incoming waves arrive to the listener at the same time, as in the case of equidistant loudspeakers. Once the loudspeaker inputs are compensated to account for off-axis listening positions, the audio object panning is achieved using vector base amplitude panning (VBAP)[4]. The VBAP formulation has been adapted here to allow for off-axis listening position

rendering. The objects can be plane-wave objects or point-source objects. If the listener moves, he or she will perceive that the incoming direction of the plane-wave objects does not change in the case of point-source objects or that or that the position of the sources is static in absolute coordinates in the space. This provides the listener with *motion parallax* cues, creating a greater 3-dimension awareness, as well as perception of depth.

Section 2 of the paper introduces the practical implementation of the system and the compensation used for extending the sweetspot for listening positions which are not symmetrical with respect to the two loudspeakers (*asymmetrical* listening positions). Section 3 presents the VBAP formulation, which has been adapted to account for asymmetrical listening positions. Objective localisation measurements based on the interaural time difference (ITD) have also been presented. Section 4 summarises the main aspects presented in this work.

## 2 AN ADAPTIVE STEREO SYSTEM WITH LISTENER COMPENSATION

### 2.1 Implementation

The formulation which is presented in the following sections has been implemented in a real-time system using a standard PC with the MAX MSP 6 software system. The implementation uses a Microsoft Kinect together with the *dp.kinect* MAX patch to perform the listener tracking[5]. A screenshot of the MAX patch is reported in Fig. 1.

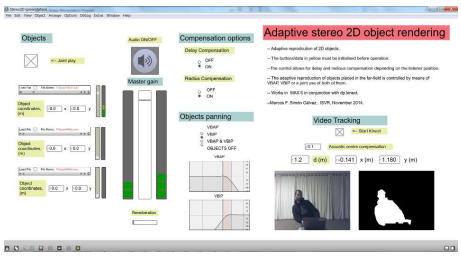



Figure 1: MAX MSP external implementation adaptive stereo object renderer.

### 2.2 Notation definition

Fig. 2 shows the reference system which is employed for finding the relative position of the listener with respect to the loudspeakers. The vector notation used is as follows: a given vector $\mathbf{x}$ is defined by a magnitude $|x|$ and by an unitary pointing vector $\widehat{\mathbf{x}}$. The vectors $\mathbf{r}_R$ and $\mathbf{r}_L$ define the orientation and distance from each loudspeaker to the centre of the listener's head. These are formulated as

$$\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0) = -\mathbf{x}_0 - \mathbf{d}, \text{ and } \mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0) = \mathbf{x}_0 - \mathbf{d}, \tag{1}$$

where $\mathbf{d}$ is the vector representing the right loudspeaker position with respect to the tracking system position.

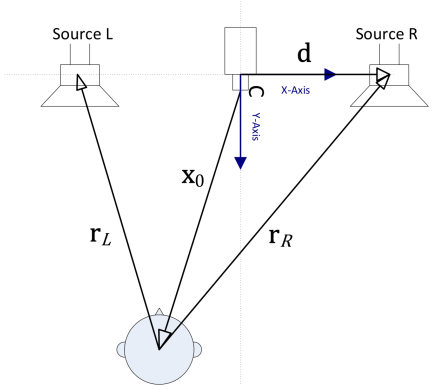



Figure 2: Definition of vectors and quantities used for the adaptive stereo. The Kinect, represented by the camera at $C$, defines the origin of coordinates ($x = 0$ m,$y = 0$ m).

Using these vectors, the total field generated by both loudspeakers at a listener position $(\mathbf{x}_0)$ is defined as

$$p(\mathbf{x}_0,\omega) = \frac{\tilde{s}_L(\omega)}{4\pi|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|}e^{-jk(|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|)} + \frac{\tilde{s}_R(\omega)}{4\pi|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|}e^{-jk(|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|)}, \tag{2}$$

where $\omega$ is the angular frequency, $k = \omega/c_0$ the wavenumber, $c_0 = 344$ m/s is the speed of sound and $e^{-j\omega t}$ represents a time delay. The symbols $\tilde{s}_L(\omega)$ and $\tilde{s}_R(\omega)$ represent the compensated loudspeaker signals.

## 2.3 Compensation

In order to provide an accurate localisation of virtual sources regardless of the listener position, the first requirement is to ensure that the soundwaves propagating from each loudspeaker arrive at the listener position at the same time instant and with the same amplitude, as it occurs in a symmetric listening situation. This is achieved by applying a gain and a delay to the loudspeaker signals to compensate for the distance attenuation and time of travel of the waves. The gain compensation is performed by multiplying both input signals $s_L(\omega)$ and $s_R(\omega)$ by $|\mathbf{r}_L|$ and $|\mathbf{r}_R|$ respectively. The delay compensation is performed differently depending on the relative sign of the difference $|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)| - |\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|$. It the listener is closer to the left source, the compensation is applied as

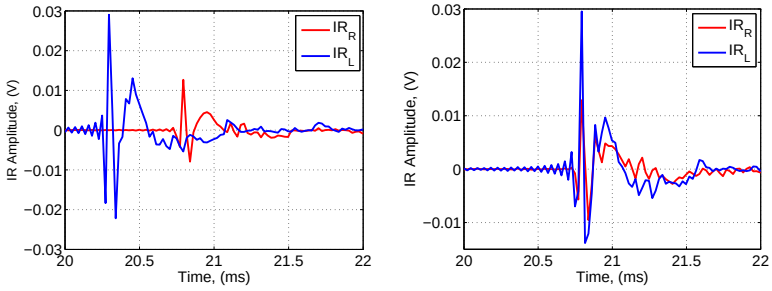
$$\tilde{s}_L(\omega) = s_L(\omega)|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|e^{jk(|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|)}, \text{and } \tilde{s}_R(\omega) = s_R(\omega)|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|, \tag{3}$$

being $s_L$ the left input signal. If in the other hand the listener is closer to the right source, the right source input feed is given

$$\tilde{s}_R(\omega) = s_R(\omega)|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|e^{jk(|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|)}, \text{and } \tilde{s}_L(\omega) = s_L(\omega)|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|, \tag{4}$$

being $s_L(\omega)$ and $s_R(\omega)$ the left and right input signals respectively. The frequency independent delays $e^{jk(|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|)}$ and $e^{jk(|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|)}$ are implemented in real time by applying a fractional delay[6] of $\delta(t-(|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|))$ and $\delta(t-(|\mathbf{r}_R(\mathbf{x}_0)|-|\mathbf{r}_L(\mathbf{x}_0)|))$.

The effect of compensation for gain and delay on the impulse responses of each loudspeaker is shown in Fig. 3, for a position which corresponds to ($x = -0.41$ m, $y = 1.15$ m). The impulse responses have been obtained by inverse Fourier transformation of the measured frequency responses between the input to the system and a microphone at the given locations. When no




(a) Pos. 1, OFF (b) Pos. 1, ON

Figure 3: Measured impulse response (IR) of each of the loudspeaker, $IR_L$ for left loudspeaker and $IR_R$ for the right loudspeaker; without compensation, Figure (a), and with compensation, Figure (b), corresponding to a listening position at ($x = -0.41$ m, $y = 1.15$ m).

signal compensation is applied, a large delay between the impulse responses from each loudspeaker can be observed in Fig. 3a. When the compensation is used, which is shown in Fig. 3b, the impulse response peaks coincide. There is, however, a large variability in the peak amplitude, which is not so accurately equalised. This suggests that the position and frequency dependence on the individual radiation patterns of each loudspeaker requires a more accurate compensation than just by compensating according to the distance from the loudspeaker.

## 3 OBJECT PANNING

Amplitude panning applies different gain values to the input signals of a set of loudspeakers to steer the propagation direction of an original input signal. For a given mono object with associated signal $s_0(\omega)$ and placed in a certain position in the space, it is possible to create a set of loudspeaker signals given by

$$s_L(\omega) = s_0(\omega) g_L(\mathbf{x}_0), \text{ and } s_R(\omega) = s_0(\omega) g_R(\mathbf{x}_0), \tag{5}$$

where $g_L(\mathbf{x}_0)$ and $g_R(\mathbf{x}_0)$ represent the normalised panning gains for the listener position $\mathbf{x}_0$. The loudspeaker signals $s_L(\omega)$ and $s_R(\omega)$ can be further compensated to account for the listener position, as performed in Equations 3 and 4, to give compensated loudspeaker signals $\tilde{s}_L(\omega)$ and $\tilde{s}_R(\omega)$.

### 3.1 Object panning strategies

The orientation of the different audio objects is adjusted using panning techniques as vector base amplitude panning (VBAP)[4]. The VBAP formulation is used to adjust the amplitude of the loudspeaker feeds so that an object is perceived as being located at a given position, as shown in Fig. 4, where the normalised input feeds $g_L(\mathbf{x}_0)$ and $g_R(\mathbf{x}_0)$ are calculated to keep the position of the audio object static independently of the listener position.

For a given listener position, an object orientation vector $\mathbf{p}_0$ is created according to

$$\mathbf{p}_0(\mathbf{x}_0) = g'_L(\mathbf{x}_0)\hat{\mathbf{r}}_L(\mathbf{x}_0) + g'_R(\mathbf{x}_0)\hat{\mathbf{r}}_R(\mathbf{x}_0), \tag{6}$$

where $g'_L(\mathbf{x}_0)$ and $g'_R(\mathbf{x}_0)$ are the unnormalised gain factors of each loudspeaker and $\hat{\mathbf{r}}_L(\mathbf{x}_0)$ and $\hat{\mathbf{r}}_R(\mathbf{x}_0)$ are the unitary pointing vectors of each loudspeaker. In the original VBAP formulation it is

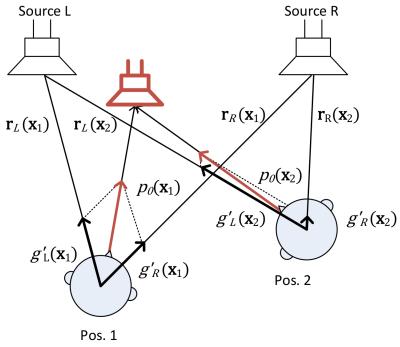



Figure 4: Example of how the VBAP gains are adjusted for two listener position so that the object stays static relative to the listener at a desired 2D coordinate.

assumed that the listener is placed at the same distance from both loudspeakers and hence $\widehat{\mathbf{r}}_L$ and $\widehat{\mathbf{r}}_R$ are only calculated once. In the formulation presented here, however, these account for asymmetrical listening situations. The above equation can be rewritten in matrix notation

$$\begin{bmatrix} p_{0_y}(\mathbf{x}_0) \\ p_{0_x}(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{L_y}(\mathbf{x}_0) & r_{R_y}(\mathbf{x}_0) \\ r_{L_x}(\mathbf{x}_0) & r_{R_x}(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g'_L(\mathbf{x}_0) \\ g'_R(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix}, \tag{7}$$

where the subscripts $_y$ and $_x$ indicate the orthogonal projections on the $y$ and $x$ axis of the pointing vectors $\widehat{\mathbf{r}}_L(\mathbf{x}_0)$ and $\widehat{\mathbf{r}}_R(\mathbf{x}_0)$ and of the virtual source pointing vector $\mathbf{p}(\mathbf{x}_0)$. For a virtual source placed at a position defined by the object pointing vector $\mathbf{p}_0$, the required gains are obtained by[4]

$$\begin{bmatrix} g'_L(\mathbf{x}_0) \\ g'_R(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{L_y}(\mathbf{x}_0) & r_{R_y}(\mathbf{x}_0) \\ r_{L_x}(\mathbf{x}_0) & r_{R_x}(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{0_y}(\mathbf{x}_0) \\ p_{0_x}(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix}. \tag{8}$$

The unnormalised gains $g'_L(\mathbf{x}_0)$ and $g'_R(\mathbf{x}_0)$ are then converted into normalised gains $g_L(\mathbf{x}_0)$ and $g_R(\mathbf{x}_0)$, so that the acoustic power at the listener position is equal to a certain value, here assumed to be unitary. The normalisation can be performed assuming coherent summation, as it is understood to occur at low frequencies, or assuming incoherent summation, as it occurs at higher frequencies. If coherent normalisation is used, the loudspeaker feeds are normalised so that $g_L(\mathbf{x}_0) + g_R(\mathbf{x}_0)$=1. However, coherent normalisation has the risk of turning the system unstable for phantom source positions in which the loudspeaker feeds are equal in magnitude but with opposite phase, as it happens when objects are panned outside the loudspeaker span. Furthermore, as the system is aimed to be used in a, normal, reverberant room, loudness is best preserved if both gains are normalised with the square root of the powers[7], as also uncorrelated reflections contribute to the general pressure level.

Thus, in order to avoid system instability, incoherent normalisation is preferred throughout the whole frequency band, with the constraint that $\sqrt{g_L^2(\mathbf{x}_0) + g_R^2(\mathbf{x}_0)}$=1. Below 1.5 kHz, it is possible to place objects outside of the stereo span, thanks to the coherent summation of the waves. The panning gains for the low frequency range, $g_L^{(LF)}(\mathbf{x}_0)$ and $g_R^{(LF)}(\mathbf{x}_0)$, are given by

$$g_L^{(LF)}(\mathbf{x}_0) = \frac{g'_L(\mathbf{x}_0)}{\sqrt{g'^2_L(\mathbf{x}_0) + g'^2_R(\mathbf{x}_0)}}, \tag{9}$$

and

$$g_R^{(LF)}(\mathbf{x}_0) = \frac{g'_R(\mathbf{x}_0)}{\sqrt{g'^2_L(\mathbf{x}_0) + g'^2_R(\mathbf{x}_0)}}. \tag{10}$$

Above 1.5 kHz, the gains are normalised in the same way as for the low frequency region when the phantom source lies inside the stereo span. When the phantom source is outside the stereo span, the loudspeaker feed closer to the phantom source is set to 1, with the other loudspeaker feed set to 0. The cut-off frequency of 1.5 kHz has been selected heuristically and may depend on the distance $2|\mathbf{d}|$ between the loudspeakers and the type of room where the system is placed. The high frequency panning gains, $g_L^{(HF)}(\mathbf{x}_0)$ and $g_R^{(HF)}(\mathbf{x}_0)$, are defined by

$$g_L^{(HF)}(\mathbf{x}_0) = \frac{g'_L(\mathbf{x}_0)}{\sqrt{g'^2_L(\mathbf{x}_0) + g'^2_R(\mathbf{x}_0)}} \text{ if } \quad (g'_L(\mathbf{x}_0) > 0, g'_R(\mathbf{x}_0) > 0), \text{or else} \quad 1 \text{ if } g'_R(\mathbf{x}_0) < 0, \tag{11}$$

and

$$g_L^{(HF)}(\mathbf{x}_0) = \frac{g'_L(\mathbf{x}_0)}{\sqrt{g'^2_L(\mathbf{x}_0) + g'^2_R(\mathbf{x}_0)}} \text{ if } \quad (g'_L(\mathbf{x}_0) > 0, g'_R(\mathbf{x}_0) > 0), \text{or else} \quad 1 \text{ if } g'_R(\mathbf{x}_0) < 0,$$

The normalised panning gains for the low and high frequency bands are then compensated depending on the listening position according to Equations 3 and 4 to give the compensated and normalised panning gains, $\tilde{g}_L^{LF}(\omega)$, $\tilde{g}_R^{LF}(\omega)$, $\tilde{g}_L^{HF}(\omega)$ and $\tilde{g}_R^{HF}(\omega)$. For a given audio object $s_0(\omega)$, this is passed through a filtering stage which decomposes the object into a low frequency band and a high frequency band. The output of such filtering stage is afterwards multiplied by the respective low and high frequency compensated and normalised panning gains and then combined to give the compensated loudspeaker signals $\tilde{s}_L(\omega)$ and $\tilde{s}_R(\omega)$.

## 3.2 Localisation measurements

In order to assess the ability of the real time system, an initial set of measurements has been performed. These have been done in an audio listening room with a low reverberation time using a Kemar dummy head. Impulse responses to both ears of the dummy head have been calculated, and the ITD has been obtained as parameter to assess the performance of the system. The ITD function, $\Psi(t)$, is obtained via the interaural cross-correlation function[8], which is calculated according to

$$\Psi(t) = \underset{\tau}{argmax}\left(E\left\{h_L(t)h_R(t+\tau)\right\}\right), \tag{12}$$

where $h_L(t)$ and $h_R(t)$ are left and right ear impulse responses. These responses are low-pass filtered below 700 Hz, since this frequency range is considered to be of importance for the ITDs[9].

The measurements have been performed at the sweet spot, at an asymmetrical position, ($x = -0.4$ m, $y = 2.0$ m), and at a listening position where the listener is outside of the loudspeaker span, ($x = -1.0$ m,$y = 2.0$ m). The dummy head has been rotated towards the target source direction, which has been panned using the formulation described above. In this case, a 0 ITD would ideally be obtained for a plane wave propagating from that direction. The measured results are shown in Fig. 5, where they are compared against the ITD measured for a single loudspeaker as a function of head orientation. When the dummy head is on the sweet spot, and each loudspeaker is at an angle of 30 ° from the listener position, the results show how the system is able to pan a virtual source with a less than 0.1 ms of ITD difference between -40° and 60°. The ITD difference is lowest between the loudspeaker span 0 at -30° and 30°, where the dummy head is orientated towards the loudspeakers. Between -60° and -40° the ITD difference grows, probably due to errors introduced on the tracking system.

As the dummy head is moved towards the left of the loudspeakers symmetry axis, the ITD error gets larger for sources panned towards negative angles (i.e., towards side where the dummy head

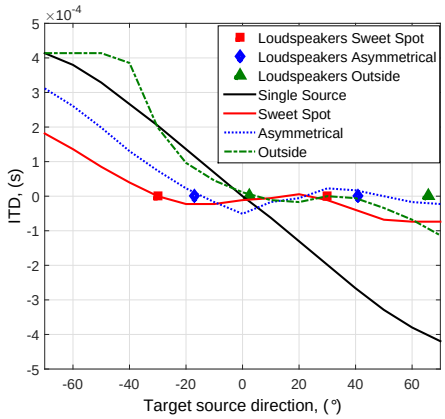



Figure 5: ITD difference obtained from panning a virtual source between -70° and 70°. Results measured at the sweet spot, at an asymmetrical listening position, ($x = -0.4$ m, $y = 2.0$ m), and at a listening position outside of the loudspeaker span, ($x = -1.0$ m,$y = 2.0$ m). The black thick dashed line shown for comparison is the measured ITD from a single loudspeaker.

has been moved to). This, however, remains very close to 0 for the case when the dummy head is at an asymmetrical listening position, ($x = -0.4$ m, $y = 2.0$ m) between -20°, where the closest loudspeaker is placed, and 60 °. If the dummy head is moved further to the left, so that it is now placed outside of the loudspeaker set up, the localisation is still good, i.e., the ITD difference is close to 0, for virtual sources incoming between 0° and 40°. For virtual sources panned between 40° and $60°$ the ITD difference grows to be about 1 ms at $60°$. This indicates that the perceived localisation of virtual sources coming from such direction is affected by small inaccuracies in the tracking system and in the loudspeaker radiation pattern. Nevertheless, it is shown how the ITD difference for target source directions inside the loudspeaker span is small compared to that measured from a single loudspeaker rotated along the dummy head.

## 4 CONCLUSION

An adaptive stereo system for object based reproduction has been presented. By constantly calculating the position of the listener with respect to both loudspeakers, the proposed formulation adjusts the loudspeaker signals when the listener is outside of the sweet spot, assuring that both loudspeaker feeds arrive with the same amplitude and at the same time. Whilst it is not totally possible to adjust for the loudspeaker directivity, which is frequency and orientation dependent, it is possible to adjust the time arrival of both signals.

The proposed approach is also used for the reproduction of audio objects. Vector base amplitude panning (VBAP) is used for obtaining loudspeaker gains which allow controlling the position of the audio objects, with the loudspeaker feeds also adapted to the listener position. The loudspeaker feeds are calculated differently for low and high frequencies, with a cut off frequency of 1.5 kHz. Below this frequency, the original VBAP formulation is used independently of the listener-object position, and above that frequency, the VBAP formulation is used for objects placed inside the loudspeaker span. This allows to extend the stereo span for the low frequencies, where both pressure waves add coherently. Two normalisation options have been evaluated to weight the panning gains at low frequencies, coherent and incoherent normalisation.

Localisation measurements based on the ITD have shown that this is only accurate when the virtual audio sources are panned inside of the loudspeaker span, even for listener positions outside of the loudspeaker span. The ability to pan audio objects outside of the loudspeaker span requires a very accurate and calibrated system, and it is just obtained for certain listening positions.

## 5 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors of the paper would like to acknowledge the support of the EPSRC Programme Grant S3A: Future Spatial Audio for an Immersive Listener Experience at Home (EP/L000539/1) and the BBC as part of the BBC Audio Research Partnership.

## References

[1] A. D. Blumlein, “British patent specification 394,325 (improvements in and relating to sound-transmission, sound-recording and sound-reproducing systems),” *J. Audio Eng. Soc*, vol. 6, no. 2, pp. 91–98, 130, 1958.

[2] B. B. Bauer, “Broadening the area of stereophonic perception,” *J. Audio Eng. Soc*, vol. 8, no. 2, pp. 91–94, 1960.

[3] S. Merchel and S. Groth, “Adaptively adjusting the stereophonic sweet spot to the listeners position,” *J. Audio Eng. Soc*, vol. 58, no. 10, pp. 809–817, 2010.

[4] V. Pulkki, “Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning,” *J. Audio Eng. Soc*, vol. 45, no. 6, pp. 456–466, 1997.

[5] D. Phurrough, “dp.kinect, MAX MSP patch for Microsoft Kinect .” [Online]. Available: https://hidale.com/shop/dp-kinect/

[6] T. Laakso, V. Valimaki, M. Karjalainen, and U. Laine, “Splitting the unit delay [fir/all pass filters design],” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 13, no. 1, pp. 30–60, Jan 1996.

[7] M.-V. Laitinen, J. Vilkamo, K. Jussila, A. Politis, and V. Pulkki, “Gain normalization in amplitude panning as a function of frequency and room reverberance,” in *Audio Engineering Society Conference: 55th International Conference: Spatial Audio,* Aug 2014.

[8] B. F. G. Katz and M. Noisternig, “A comparative study of interaural time delay estimation methods,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 6, pp. 3530–3540, 2014.

[9] D. Howard and J. Angus, *Acoustics and Psychoacoustics*. Taylor & Francis, 2009.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DE LA CALIDAD DE LOS AURICULARES EN LA PERCEPCIÓN ESPACIAL SONORA

REFERENCIA PACS 43.60.Dh

Gutiérrez-Parera, Pablo; López, José J; Aguilera, Emanuel
Universidad Politécnica de Valencia
ITEAM, Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
Camino de Vera s/n, Edificio 8G esc D
46022 Valencia
Tel: +34 963 877 007 (Ext. 73008) Fax: +34 963 879 583
pabgupa@iteam.upv.es; jjlopez@dcom.upv.es, emagmar@iteam.upv.es

**ABSTRACT**
The reproduction of sound with low quality headphones is very common, mostly with portable devices as MP3 players or smartphones. This lack of headphones quality can affect the spatial perception apart from the general sound quality. By means of three subjective perceptual tests we have studied the effect of disparities between left and right transducers, the influence of the frequency response and nonlinear distortion. Five headphones representative of different technologies and qualities were employed. The results show that from disparities of 1dB location errors appears and that frequency response has a significant influence on the spatial perception, whereas nonlinear distortion does not have significant effects.

**RESUMEN**
La reproducción de sonido a través de auriculares de baja calidad es un hecho muy común, sobre todo con dispositivos móviles como reproductores de música o teléfonos. Esta falta de calidad puede afectar a la percepción de la sensación espacial así como a la calidad sonora. Mediante tres tests de percepción subjetiva, se han analizado los efectos de la disparidad entre el transductor izquierdo y derecho, la influencia de la respuesta en frecuencia y la distorsión no lineal, para cinco auriculares representativos de distintas tecnologías y calidades. Los resultados muestran que a partir de disparidades de 1dB hay errores en la localización de la dirección, que la respuesta en frecuencia tiene mucha influencia en la percepción espacial, mientras que la distorsión no lineal no tiene efectos significativos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La reproducción de sonido binaural mediante auriculares utiliza los principios del sistema de audición humano basado en dos oídos [1]. Se asume el hecho de que si mediante auriculares somos capaces de reproducir en los oídos del oyente las mismas presiones sonoras que experimentaría en la realidad, podemos simular una inmersión acústica realista [2].

Para que la sensación de inmersión espacial sea correcta, se deben utilizar tanto micrófonos de alta calidad para la grabación con simuladores de torso y orejas HEATS (*Head and Torso Simulator*), como auriculares de calidad para la reproducción. Sin embargo, en un gran número de casos los usuarios utilizan auriculares de baja gama, bien por cuestiones de coste o bien porque por comodidad se usan los que acompañan de serie a dispositivos móviles como teléfonos o reproductores de música, que en raras ocasiones son óptimos.

En general se sabe que un auricular de bajo coste suele proporcionar una sensación de inmersión más deficiente, pero no se ha estudiado suficientemente que factores degradantes son exactamente los que provocan dicha merma de calidad y de sensación espacial, y a qué nivel afectan cada uno.

Podemos suponer que factores como la respuesta en frecuencia, la distorsión y la disparidad entre el transductor izquierdo y derecho podrían ser algunos de los factores degradantes comentados, especialmente en auriculares de baja calidad. Por ello, proponemos una serie de tests perceptivos [3] para estudiar estos factores.

El presente estudio es continuación de un trabajo anterior donde se realizó una primera prueba para analizar cómo afecta la disparidad de niveles entre los dos transductores (derecho e izquierdo) de unos auriculares [4]. En dicho trabajo previo se emplearon grabaciones binaurales sobre las que se simularon disparidades entre transductores. Con estos sonidos como estímulos veinte personas realizaron un primer test de percepción subjetiva. Los resultados confirmaron que a partir de diferencias de 1dB entre los transductores empieza a notarse una degradación en la localización en azimut de las fuentes sonoras. Además, el tipo de sonido tiene una fuerte influencia en la localización, siendo más sensibles a las disparidades el ruido de banda ancha y la voz. Los ángulos de posición de las fuentes sonoras también influyen en la localización, siendo más sensibles a la disparidad los ángulos más lateralizados.

En este trabajo se continúa con el estudio anterior realizando dos nuevos tests de percepción. Un segundo test que estudia el efecto de la respuesta en frecuencia y un tercero que evalúa cómo afecta la distorsión no lineal. La respuesta en frecuencia es una característica muy diversa y relacionada con la supuesta calidad de los auriculares. Por otro lado la distorsión puede ser considerable si se reproducen sonidos de gran dinámica a niveles altos. Ambos factores son muy variables según el tipo y modelo de auriculares, por ello resulta interesante comprobar su relación con la sensación espacial sonora.

## 2. TEST RESPUESTA EN FRECUENCIA

### 2.1. Selección de auriculares y medidas previas

Para realizar esta prueba se seleccionaron varios auriculares que fueran representativos de modelos comerciales comunes que puedan utilizar usuarios habituales de auriculares. Según este principio se seleccionaron seis modelos de auriculares distintos para llevar a cabo el experimento.

Para evitar el efecto placebo de los distintos auriculares (tamaño, ergonomía, tacto…) que pudiera influir en las respuestas de los oyentes, se optó por simular todos los auriculares mediante unos de referencia. Con ellos se reprodujeron todos los sonidos simulando la salida de los distintos auriculares bajo estudio mediante procesado de las señales. Como auriculares de referencia (REF) se tomaron unos Sennheiser HD800, debido a su gran fidelidad, respuesta y precisión tímbrica. Los otros cinco auriculares se seleccionaron para cubrir el rango de uso cotidiano comentado antes. (No se mencionarán aquí las marcas y modelos del resto de auriculares, dado que la intención de este estudio no es tratar sobre estos asuntos).

Los auriculares empleados en el estudio se clasificaron como:

- Alta Calidad abiertos (HQab)
- Alta Calidad cerrados (HQce)

- Gran Diafragma semi-abiertos (GDsa)
- Bajo Coste multimedia (BCmul)
- Auriculares de Aerolínea (AirL)

En la figura 1 están representadas las respuestas en frecuencia de todos los auriculares empleados, incluyendo los de referencia, en el siguiente orden (de arriba abajo): 1-REF, 2-HQab, 3-HQce, 4-GDsa, 5-BCmul, 6-AirL. Para medir la respuesta se empleó una señal de barrido [5] reproducida sobre un maniquí HEATS (*Head and Torso Simulator*) del modelo B&K Type 4100 (figura 2).

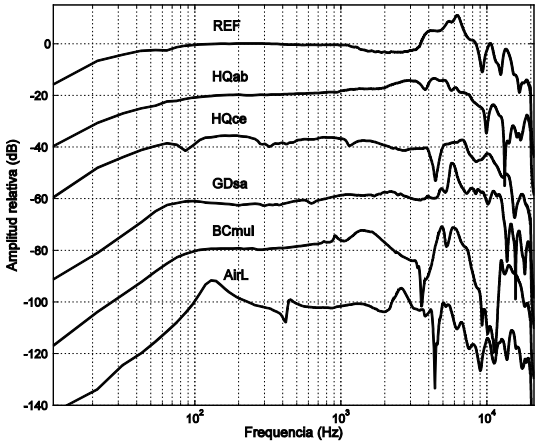



**Figura 1**. Respuestas en frecuencia de los auriculares empleados (separadas -20dB)



**Figura 2**. Montaje y maniquí para la medida de los auriculares

La primera curva corresponde a los auriculares de referencia, que muestran una respuesta en campo difuso muy buena. Los tres siguientes auriculares (2-HQab, 3-HQce, 4-GDsa) se eligieron para representar a modelos de buena calidad pero con diferentes características de construcción: abiertos, cerrados y semi-abiertos. Por debajo de 6kHz la respuesta en frecuencia de todos ellos es bastante plana, a excepción de un pico de caída de la curva 3 (HQce) a 4,5kHz que baja hasta -14dB, y otro pico esta vez hacia arriba de la curva 4 (GDsa) de 15dB a 6kHz. Las últimas dos curvas representan las respuestas en frecuencia de los auriculares multimedia (5-BCmul) y los de aerolínea (6-AirL), que se eligieron por su baja calidad. Sus respuestas en frecuencia tienen picos y valles relevantes que afectan al sonido. La curva 5 (BCmul) tiene un refuerzo alrededor de 1,5kHz y una gran caída a 3,5kHz. La curva 6 (AirL) tiene una gran elevación a 140Hz y una serie de subidas y bajadas de la respuesta a partir de 4,5kHz.

Los cinco auriculares bajo estudio se simularon y reprodujeron mediante los auriculares de referencia (REF- Sennheiser HD800). Para simular los distintos auriculares se aplicaron las respuestas en frecuencia de cada uno de ellos y se corrigió el efecto de los propios auriculares de referencia mediante la convolución con su respuesta en frecuencia invertida (Ecuación 1).

$$H_{i\ corregida}(\omega) = \frac{H_i}{H_{HD800}(\omega)} \qquad (1)$$

### 2.2. Descripción del test

En este test los participantes debían escuchar mediante auriculares varios fragmentos de audio y evaluar su calidad e imagen espacial. Los distintos auriculares fueron simulados mediante convolución de sus respuestas en frecuencia con los estímulos sonoros, y a su vez todos ellos fueron reproducidos usando los auriculares de referencia.

Dado que el efecto de las distintas respuestas en frecuencia producen efectos perceptivamente claros, se diseñó una prueba según la recomendación ITU-R 1534-2 [6] que describe el test perceptivo conocido como MUSHRA. Este tipo de test se emplea como método para la evaluación subjetiva del nivel de calidad intermedia de sistemas de audio y también describe todos los requisitos necesarios para realizar la prueba con rigor. Utiliza una escala continua de 0 (mala) a 100 (excelente) para evaluar la calidad y otros parámetros subjetivos, empleando siempre un sonido de referencia. En este tipo de test todos los sistemas se comparan con una referencia de máxima calidad, además de todos los sistemas entre sí.

Los participantes de la prueba debían responder dos cuestiones distintas. Su primera tarea fue evaluar la calidad del sonido con respecto a la referencia. Después de un descanso, la segunda tarea consistió en evaluar la imagen espacial (localización, sensación de profundidad, inmersión y realismo del sonido) con respecto a la referencia.

Como fuentes sonoras se usaron cinco fragmentos de audio diferentes (de entre 12 y 14 segundos), todos ellos reproducidos mediante la simulación de los distintos auriculares empleados en el estudio. El primer fragmento de sonido era una pieza musical con voz femenina y guitarra (*Haugebonden* del CD de música *Women en Mi* de Bettina Flater). El segundo fragmento era una canción con voz masculina y guitarra (*Zambra Gitana* del CD *Canción Andaluza* de Paco de Lucía). Como tercer fragmento de audio se emplearon unos segundos de música orquestal con gran variación dinámica (*Night Boarders* de la BSO de *The Mummy* compuesta por Jerry Goldsmith). Los fragmentos cuarto y quinto fueron grabaciones binaurales, una pieza de jazz (*Basin Street Blues*, versión de The Chad Fisher Group) y un sonido ambiente de la audiencia de un concierto con sonidos de batería (*Smashing Pumpkins Live at Northrop Auditorium 2000*). Todos los fragmentos sonoros se eligieron por sus atributos tímbricos, espaciales y estereofónicos.

Para cada uno de los fragmentos de sonido descritos, se realizó una simulación de la escucha de los cinco auriculares bajo estudio referidos en el punto 2.1. Estas cinco simulaciones de los auriculares se presentaron de manera aleatoria, en series por cada fragmento de sonido. Además en la serie se incluía una señal de referencia (REF) y dos señales de ancla. La señal de referencia era el mismo fragmento sonoro sin ningún tratamiento ni simulación añadida. La primera señal de ancla (ANC1) era una versión del fragmento sonoro filtrado con un filtro paso bajo de 7kHz de frecuencia de corte (se corresponde con el ancla de calidad media de la recomendación ITU-R 1534-2). La segunda señal de ancla (ANC2) era una versión monoaural del sonido, escogida para servir de referencia a la pregunta sobre impresión espacial. Según lo anterior, el número de estímulos empleado en este test fue de (5 simulaciones de auriculares + 1 referencia oculta + 2 señales de ancla) x5 fragmentos sonoros = 40 estímulos, presentados en series de 8 estímulos más su referencia.

Tal y como recomienda la norma ITU, se desarrolló una interfaz gráfica para que fueran los propios participantes los que dirigieran el test de percepción (método doble ciego). De esta manera podían escuchar los diferentes estímulos así como la referencia de manera completamente libre y tantas veces como quisieran. Los distintos sonidos se presentaban en series aleatorias de las distintas simulaciones, anclas y referencia oculta, para compararse con el sonido de referencia. Una vez que el participante había puntuado todos los fragmentos de la serie, se presentaba un nuevo fragmento sonoro con sus simulaciones para que se evaluaran igualmente. Este proceso se repitió dos veces para todos los fragmentos, la primera vez para la pregunta sobre calidad y, después de un descanso, una segunda vez para la cuestión sobre impresión espacial.

11 personas realizaron el test, 7 hombres y 4 mujeres (de entre 21 a 37 años, media de edad de 30). El tiempo medio de ejecución fue de 22 minutos para la primera parte y 16 para la segunda. Cada participante realizó una sesión de entrenamiento antes de realizar el test real, con la intención de que pudieran haber escuchado todos los estímulos y adquirieran familiaridad con la interfaz y las tareas asignadas.

### 2.3. Resultados

La figura 3 muestra la media de las respuestas a la pregunta sobre calidad percibida (normalizadas de 0 a 100), para la referencia oculta, los cinco auriculares simulados y las dos señales de ancla. Como se puede ver, la referencia ha sido correctamente identificada en la mayoría de los casos. Los tres auriculares de supuesta buena calidad tienen las puntuaciones más altas, mientras que los dos auriculares de supuesta peor calidad tienen las puntuaciones más bajas. Las dos señales de ancla se mantienen en una puntuación intermedia entre estos dos grupos.

Un análisis de varianza confirma que la respuesta en frecuencia de los auriculares tiene una influencia muy significativa (F=58,33 gl=7 p<0,001) sobre la calidad percibida.

En la figura 4 se puede ver la media de las respuestas a la impresión espacial (normalizadas de 0 a 100) para la referencia oculta, los cinco auriculares simulados y las dos señales de ancla. Los resultados tienen bastante similitud con las respuestas sobre calidad, con una correlación muy significativa de valor r=0,648. Sin embargo hay algunas diferencias en las puntuaciones que tienen interés. Los tres auriculares de supuesta buena calidad tienen las puntuaciones más altas, al igual que en la cuestión sobre calidad, aunque en este caso los intervalos de confianza no tienen tanta separación entre ellos. Con respecto a la pregunta anterior sobre calidad, hay una mayor diferencia entre los dos auriculares de supuesta peor calidad. Los auriculares de Bajo Coste multimedia (BCmul) se sitúan ahora en el mismo rango que las señales de ancla. Además, llama la atención que la señal de ancla 2 (ANC2) no tenga una puntuación mucho menor dado que es la versión monoaural de la señal.

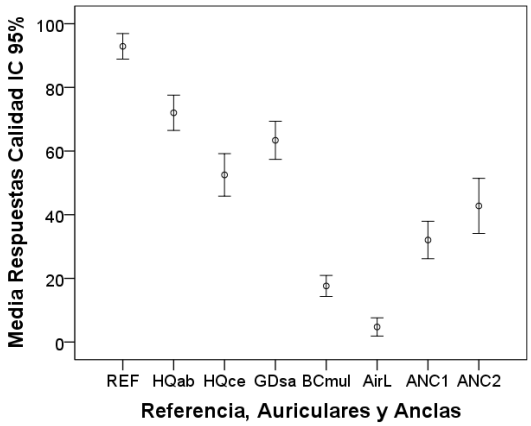



**Figura 3**. Media de las respuestas de calidad para la referencia oculta, los auriculares simulados y las señales de ancla

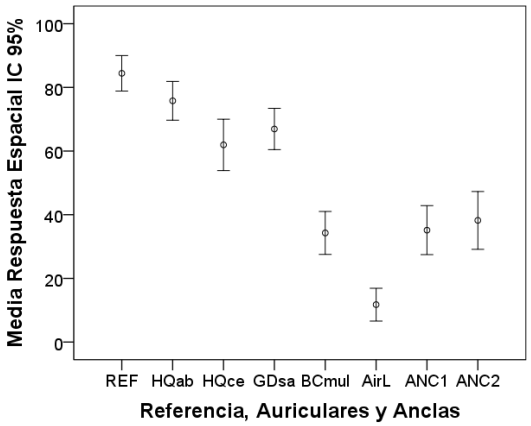



**Figura 4**. Medida de las respuestas de impresión espacial para la referencia oculta, los auriculares simulados y las señales ancla

En cualquier caso, un análisis ANOVA confirma que la respuesta en frecuencia de los auriculares tiene una influencia muy significativa (F=58,33 gl=7 p<0,001) en la percepción de la impresión espacial. No se ha encontrado ninguna influencia significativa por parte del tipo de sonido, incluso a pesar de que algunos de los fragmentos sonoros eran grabaciones binaurales.

## 3. TEST DISTORSIÓN NO LINEAL

### 3.1. Método de simulación

El objetivo de este test es medir los efectos de la distorsión armónica de los auriculares sobre la impresión espacial sonora. Es necesario establecer previamente un método de medida de la distorsión de los distintos auriculares y su simulación por medio de los auriculares de referencia.

Para medir la distorsión armónica se empleó un método de barrido sinusoidal [5] que nos dio la respuesta en frecuencia así como los armónicos segundo y tercero de la respuesta en frecuencia de manera simultánea.

En esta prueba se emplearon los mismos cinco auriculares del test anterior. En la figura 5 se muestra la respuesta en frecuencia y los órdenes de distorsión segundo y tercero de los auriculares de Aerolínea (AirL), que son los que presentaban mayor distorsión.

Para simular la distorsión no lineal escogimos el método descrito en [7] que emplea núcleos de Volterra y series de convoluciones lineales. Con este método la función de transferencia de un sistema queda descrita por medio de una expansión de series de Volterra. La señal de salida se puede representar como la suma de la convoluciones lineales de las respuestas al impulso medidas con la señal de entrada y sus correspondientes versiones desplazadas en frecuencia. Al aplicar la transformada de Fourier a estas series se obtiene un sistema lineal de ecuaciones. La solución de este sistema permite el cálculo de los núcleos diagonales de Volterra, obteniendo así los términos de respuesta al impulso de la respuesta principal y de los dos primeros órdenes de distorsión, (Ecuación 2).

$$\begin{cases} H_1 = H'_1 + H'_3 \\ H_2 = -2\hat{H}'_2 \\ H_3 = -4H'_3 \end{cases} \qquad (2)$$

Donde $H_1'$, $H_2'$, $H_3'$ son las respuestas en frecuencia medidas y $H_1$, $H_2$, $H_3$ son los núcleos de Volterra (^ representa la transformada de Hilbert).

Usando estas ecuaciones se pueden simular los órdenes de distorsión segundo y tercero mediante la convolución. Se deben aplicar los núcleos en la siguiente ecuación (Ecuación 3), donde *x(n)* es la señal de entrada y *M* es el número de muestras del núcleo:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} h_i(i) \cdot x(n-i) + \sum_{i=0}^{M-1} h_2(i) \cdot x^2(n-i) + \sum_{i=0}^{M-1} h_3(i) \cdot x^3(n-i) \qquad (3)$$

Pueden verse más detalles de esta técnica en la referencia [7]

### 3.2. Descripción del test

Para evaluar la percepción de la distorsión en este test se emplearon estímulos con y sin distorsión. El efecto de las distorsiones empleadas es bastante sutil, por ese motivo esta prueba se diseñó según la recomendación ITU-R 1116-2 [8] que describe un método para evaluar de manera subjetiva pequeñas degradaciones en los sistemas de audio, así como estrictos requisitos que deben cumplir la sala y el equipamiento con el que se realizará la prueba. Según esta recomendación, se debe emplear una escala del 1-muy molesto al 5-imperceptible para evaluar las degradaciones detectadas con respecto a la señal de referencia. El tipo de test propuesto se denomina ABC, donde dos estímulos (A y B) son presentados cada vez al participante para que sean comparados con una referencia dada (C). De entre esos dos estímulos presentados uno de ellos A o B, será siempre una referencia oculta (es decir, igual a C) y el otro la señal degradada.

Se emplearon los mismos cinco fragmentos de audio descritos en el test anterior, así como los mismos cinco auriculares descritos en el punto 2.1. En este caso, se simuló tanto la respuesta en frecuencia como las distorsiones no lineales. No se añadieron señales de ancla adicionales. Los auriculares simulados así como sus distorsiones fueron reproducidos mediante los auriculares de referencia (REF - Sennheiser HD800).

Durante el test se simularon dos versiones de cada auricular, una con y otra sin distorsión. La mecánica de la prueba consistía en evaluar de manera ciega la versión distorsionada y la no distorsionada del mismo estímulo sonoro y compararla con la versión no distorsionada que servía como referencia conocida.

En este caso a los participantes se les pidió responder a una sola cuestión: "¿Qué degradación de calidad y sensación espacial percibes con respecto a la referencia?".

El número de estímulos empleado fue: 5 auriculares simulados x 2 versiones (con y sin distorsión) x 5 fragmentos sonoros = 50 estímulos, que fueron presentados en veinticinco series de dos estímulos con su referencia correspondiente. Todas estas parejas de estímulos se mostraban aleatorizadas para cada participante, así como el orden interno de muestras con o sin distorsión (A o B).

Para llevar a cabo la prueba se desarrolló una interfaz gráfica, según la describe la recomendación, de manera que permitía a los participantes escuchar cada sonido a evaluar tantas veces como quisieran.

Las mismas 11 personas que realizaron el test anterior hicieron también éste, 7 hombres y 4 mujeres (de entre 21 a 37 años, media de edad de 30). El tiempo medio de ejecución fue de 16 minutos. Cada participante realizó una sesión de entrenamiento antes de efectuar el test real, con la intención de que pudieran haber escuchado todos los estímulos y adquirieran familiaridad con la interfaz y las tareas asignadas.

### 3.3. Resultados

Para llevar a cabo la evaluación de los resultados obtenidos, la recomendación exige calcular la diferencia entre las puntuaciones obtenidas por la referencia oculta y la puntuación obtenida por la señal distorsionada. La figura 6 muestra la media de estas diferencias para cada uno de los auriculares simulados.

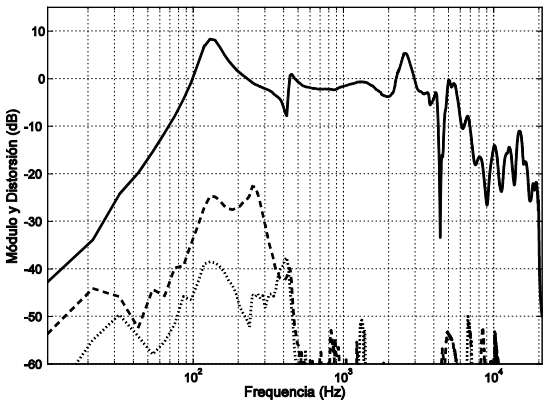



**Figura 5**. Respuesta en frecuencia, segundo y tercer órdenes de distorsión de los auriculares de Aerolínea (AirL).

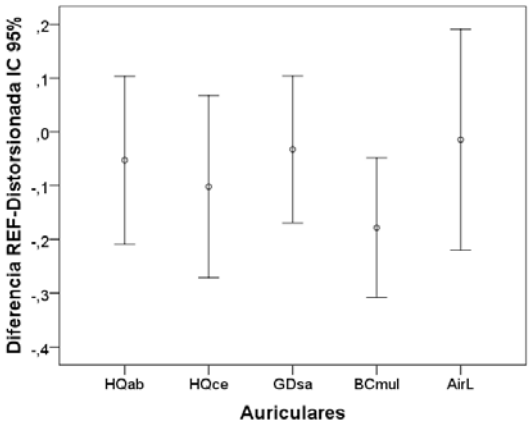



**Figura 6**. Diferencia entre la referencia oculta y la señal distorsionada, para cada uno de los auriculares.

Tal como se desprende de la gráfica anterior, un análisis de varianza confirmó que no hay ninguna relación de significancia en las respuestas de los participantes debido a los efectos que la distorsión introducida pueda generar.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio sobre la influencia de diferentes parámetros de calidad de auriculares, en el contexto de la reproducción de sonido espacial. En un trabajo previo [4] se analizaron los efectos de la disparidad de nivel entre los transductores y en el

presente escrito se han estudiado los efectos de la respuesta en frecuencia y de la distorsión no lineal mediante pruebas de evaluación subjetiva.

Se ha comprobado que la respuesta en frecuencia tiene una influencia muy importante en la impresión espacial. También se ha visto que la impresión espacial tiene una correlación muy alta con respecto a la calidad percibida. Sin embargo, no se ha encontrado ninguna influencia significativa en el hecho de usar grabaciones binaurales con respecto a mezclas estereofónicas de dos canales, lo que puede deberse quizá a que todas las muestras sonoras fueron seleccionadas con una buena sensación estereofónica. Queda pendiente para un trabajo futuro el intentar cuantificar los posibles efectos de la desviación de la respuesta en frecuencia de la ideal.

Por otro lado, la distorsión no lineal que introducen los auriculares bajo estudio no parece afectar a la percepción espacial o a la imagen binaural de las grabaciones, al menos al nivel de volumen y distorsión empleados en el test.

Como trabajo futuro también sería interesante medir parámetros objetivos de los auriculares, así como de los sonidos empleados como estímulos, para estudiar más relaciones estadísticas y buscar posibles influencias de otros factores. Además nos gustaría incluir en el estudio un mayor número de auriculares, especialmente más cantidad de baja calidad, y evaluar un mayor número de grabaciones binaurales.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad, proyecto TEC2012-37945-C02-01.

## 6. REFERENCIAS

[1] J. Blauert, “Spatial Hearing: The psychophysics of human sound localization”. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

[2] D. R. Begault, “3D Sound for Virtual Reality and Multimedia Applications”, Academic Press Professional Inc., San Diego (California), 1994.

[3] S. Bech and N. Zacharov, “Perceptual Audio Evaluation-Theory, Method and Application”, John Wiley & Sons Ltd., Sussex (UK), 2006.

[4] J. López, P. Gutiérrez-Parera, A. Aguilera, “Influencia de la calidad de los auriculares en la inmersión acústica producida por grabaciones binuaurales”,45º Congreso Español de Acústica y 8ºCongreso Ibérico de Acústica, SEA-Tecniacústica 2014, Murcia, 29-31 Octubre 2014.

[5] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique”, 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.

[6] Rec. ITU-R BS. 1534-2 “Method for the subjective assessment of intermediate quality level of audio systems”, International Union of Telecommunications, Geneva, 2014.

[7] A. Farina, E. Armelloni, “Emulation of Not-Linear, Time-Variant devices by the convolution technique”, Congresso AES Italy 2005, Como, 3-5 November 2005.

[8] Rec. ITU-R BS. 1116-2 “Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems”, International Union of Telecommunications, Geneva, 2014.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015
46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# SPATIAL REPRODUCTION OF NEAR SOURCES AT LOW FREQUENCY USING ADAPTIVE PANNING

Dylan Menzies
Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK
d.menzies@soton.ac.uk

Filippo Maria Fazi
Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK

## ABSTRACT

Panned images are unstable to head rotation. In previous work it was shown how the panning gains can be compensated using the tracked head orientation so that the Interaural Time Difference is controlled and images are stabilised. We now extend this method for near point images, for which the Interaural Level Difference must also be considered. The panning gains are no longer frequency independent, but can be approximated efficiently using a 1st order filter.

## 1 INTRODUCTION

In previous works[1,2] we estimated the localisation cues produced by a general low frequency sound field. The Interaural Time Difference (ITD) and Interaural Level Difference (ILD) were found from first order field approximation with a free-field scattering model. This framework was applied to the problem of panning reproduction. When the listener's head rotates in the sound field produced by a panning system, images produced using static gains are not fixed, for example see Fig. 1, leading to instability in the overall image. A simple formula was found relating the head orientation, image direction, and the field description given as a specific admittance, or equivalently as a Makita localisation vector. Dynamic panning gains were then found that depend on the head orientation as well as image direction, and good agreement was found with experiment.

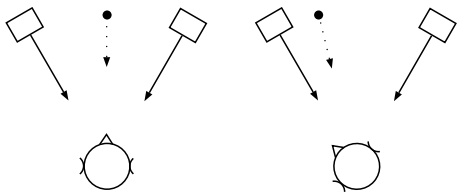


Figure 1: The black dot indicates the direction of the image when two loudspeakers each have the same signal, for different head directions.

The analysis here introduces a more accurate model for the binaural signals, using a spherical head scattering model. Surprisingly, and fortunately, the results are unaffected.The panning sources and images were previously assumed to be distant, with the individual panning fields phase aligned at the listener. This causes ITD to be zero. The main aim of this paper is to this paper is to generalise the analysis for near images, for which ITD is no longer zero. It is then hoped to create convincing images between the source loudspeakers and the listener, by modifying the panning system.

In related work we have also shown how to compensate a panning system for listener location,

creating a dynamic sweetspot, with motion parallax for distance cues[3]. Combining this process with rotation compensation provides stable images while giving the listener full freedom of movement.

We proceed by reviewing previous analysis, and extend this towards a solution for near-field panning.

## 2 Sound field representation

A source free region of a sound field can be expanded as a series about any point in the region[4]. The first order approximation of the pressure $P$ at a point $\boldsymbol{x}$, expanded about point $\boldsymbol{x_0}$ , can be given in the frequency domain in terms of pressure and gradient by

$$P(\boldsymbol{x}) \approx P(\boldsymbol{x_0}) + \nabla P(\boldsymbol{x_0}) \cdot (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_0}) \tag{1}$$

The approximation is good provided the wavelength is considerably larger than the region, and higher order derivative terms are small compared with $P(\boldsymbol{x_0})$, $\nabla P(\boldsymbol{x_0})$, which is usually the case when a source is not close. Below 700Hz a typical sound field region large enough to enclose the human head satisfies these conditions.

Although a listener's head is described as acoustically transparent at low frequencies, the binaural signals are not equal to the pressures at the corresponding locations in the incident field, due to the non vanishing scattered field. Using a spherical model for the head, with ears at antipodal locations, a simple analytical approximation can be found for the binaural signals[4]. The free field ITD is $\frac{D}{c}\cos\theta$ where $D$ is the ear separation, $c$ is the sped of sound, and $\theta$ is the angle of the incident plane wave to the inter aural axis. The sphere-scattered ITD is found to have a limit $\frac{3D}{2c}\cos\theta$ at low frequency, and constant ILD of 1 (or 0 in dB)[5] .

Furthermore the resultant pressure field is equal to the incident field at a radius $\frac{3}{2}r$, where $r$ is the sphere radius, by projection through the centre. Since any free field region can be approximated arbitrarily well by a plane wave expansion, this implies that for any incident field the resultant pressure at the surface of the sphere is given by the incident field evaluated at $\frac{3}{2}r$, for low frequency.

With the above approximations the binaural signals at the right and left ears are given by

$$P_R = P + \bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \nabla P \tag{2}$$
$$P_L = P + \bar{\boldsymbol{r}}_L \cdot \nabla P \ , \tag{3}$$

where $P$ and $\nabla P$ are the pressure and gradient at the central point between the ears and $\bar{\boldsymbol{r}}_R, \bar{\boldsymbol{r}}_L$ are related to the vectors from the centre to the right and left ears, $\boldsymbol{r}_R, \boldsymbol{r}_L$, by $\bar{\boldsymbol{r}}_R = \frac{3}{2}\boldsymbol{r}_R, \bar{\boldsymbol{r}}_L = \frac{3}{2}\boldsymbol{r}_L$. See Fig. 2.

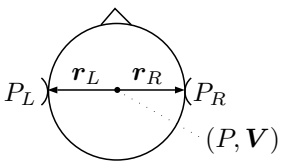



Figure 2: Sound field variables and vectors in relation to the listener's head.

The gradient is related to particle velocity $\boldsymbol{V}$ by Euler's equation in the frequency domain[6],

$$\nabla P = -jkZ_0\boldsymbol{V} \ , \tag{4}$$

using the positive frequency convention $P(\boldsymbol{x},t) = P(\boldsymbol{x})e^{j\omega t}$ . $Z_0$ is the characteristic impedance and $k$ is the wavenumber.

In the following discussion only relative pressure phases are of interest, so in order to simplify calculation the pressure and velocity are redefined by applying a phase rotation so that the pressure is positive real,

$$(P,\boldsymbol{V}) \rightarrow (P',\boldsymbol{V}') = (P,\boldsymbol{V})P^*/|P| = (|P|,\boldsymbol{V}_\Re + j\boldsymbol{V}_\Im) \tag{5}$$

with the phase rotated velocity, $\boldsymbol{V}'$, decomposed into real and imaginary parts $\boldsymbol{V}_\Re, \boldsymbol{V}_\Im$.

Proceeding with phase rotated values of pressure and velocity and the binaural signals, with primes dropped, $P, P_L, P_R, \boldsymbol{V}_\Im, \boldsymbol{V}_\Re$, and using $\boldsymbol{r}_L = -\boldsymbol{r}_R$, the binaural signals can be written

$$P_R = P + kZ_0(\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Im - j\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Re) \tag{6}$$

$$P_L = P - kZ_0(\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Im - j\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Re) \tag{7}$$

The low frequency approximation condition can be written $kr_R << 1$.

Figs 3 shows the general case where both $\boldsymbol{V}_\Im$ and $\boldsymbol{V}_\Re$ are non-zero, and in different directions. As the listener's head rotates $P_R$ and $P_L$ move around on opposite sides of an ellipse.

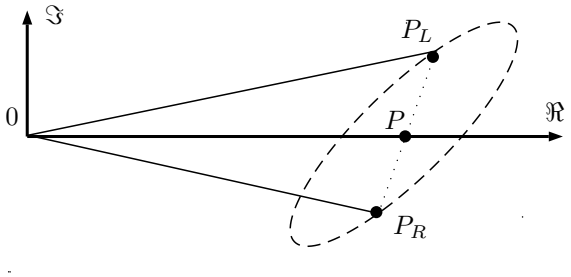



Figure 3: $P_R$ and $P_L$ in the complex plane for non zero and non aligned $\boldsymbol{V}_\Re$ and $\boldsymbol{V}_\Im$

## 2.1 Point source field representation

The pressure field of a point source is

$$P = \frac{A}{r}e^{-jkr} \tag{8}$$

where $r$ is the distance from source. The gradient is the

$$\nabla P = -P(\frac{1}{r} + jk)\hat{\boldsymbol{r}} \tag{9}$$

where $\hat{\boldsymbol{r}}$ is the unit vector in the direction from the source to the measurement position. Using (4)

$$\boldsymbol{V} = \frac{P}{Z_0}(1 - \frac{j}{kr})\hat{\boldsymbol{r}} \tag{10}$$

The complex velocity components are then

$$\boldsymbol{V}_\Re = \frac{P}{Z_0}\hat{\boldsymbol{r}} = -\frac{P}{Z_0}\hat{\boldsymbol{r}}_I \tag{11}$$

$$\boldsymbol{V}_\Im = -\frac{P}{Z_0 kr}\hat{\boldsymbol{r}} = \frac{P}{Z_0 kr_I}\hat{\boldsymbol{r}}_I \tag{12}$$

where $\hat{\boldsymbol{r}}_I = -\hat{\boldsymbol{r}}$ is the unit vector in the direction from the measurement point, where the listener is, to the source.

## 3 Localisation cues and reproduction

ITD, also known as Interaural Phase Delay for a harmonic field[7], is equal to $\phi_{RL}/\omega$, where $\phi_{RL} = \arg(P_R/P_L)$ is the Interaural Phase Difference. ILD is given by $|P_R/P_L|$. For a given pair (ITD, ILD) there is only one possible shape of the form $0 \to P_L \to P \to P_R$ in the diagram Fig. 3 (ignoring the ellipse). This can be seen by first constructing the lines through $0 \to P_L$ and $0 \to P_R$ for the given ITD, and then choosing $P_L$ and finding $P_R$ to satisfy the given ILD. The point at $P$ is then midway between $P_L$ and $P_R$.

Hence if we wish to reproduce the same image, that is the same ITD and ILD, using a synthetic field as would be produced by a natural source field then the corresponding diagrams must be similar. The shape of each diagram can be specified with two quantities describing the ratio of lengths in the diagram,

$$\frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Re}{P} \ , \quad \frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Im}{P} \tag{13}$$

For a point source using (11) we have

$$\frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Re}{P} = -\frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{r}_I}{Z_0} \tag{14}$$

$$\frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{V}_\Im}{P} = \frac{\bar{\boldsymbol{r}}_R \cdot \boldsymbol{r}_I}{k r_I Z_0} \tag{15}$$

These equations can be reinterpreted es constraints of similarity between a point source field and a general field $(P, \boldsymbol{V})$. Rearranging, the constraints can be written

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{R}} \cdot (\frac{Z_0}{P}\boldsymbol{V}_\Re + \hat{\boldsymbol{r}}_I) = 0 \tag{16}$$

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{R}} \cdot (\frac{Z_0 k r_I}{P}\boldsymbol{V}_\Im - \hat{\boldsymbol{r}}_I) = 0 \tag{17}$$

The first constraint was arrived at in our previous studies on distant image reproduction. The second constraint in the form (15) was also satisfied since then $\boldsymbol{V}_\Im = 0$ and $r_I$ is infinite.

## 4 Panning

Amplitude panning is a spatial audio reproduction method in which several loudspeakers are assumed to produce plane waves converging at the listener in phase. The pressure and velocity at the listener are given by the sum of the pressure and velocity of these waves. Then

$$Z_0 \frac{\boldsymbol{V}}{P} = Z_0 \frac{\sum \boldsymbol{V}_i}{\sum P_i} = \frac{\sum P_i \hat{\boldsymbol{V}}_i}{\sum P_i} = \frac{\sum g_i \hat{\boldsymbol{V}}_i}{\sum g_i} = -\boldsymbol{r}_V \tag{18}$$

where $\{g_i\}$ are gains applied to a source signal to provide the loudspeaker feeds, and $\boldsymbol{r}_V$ is the *Makita localisation vector*,

$$\boldsymbol{r}_V = \frac{\sum g_i \hat{\boldsymbol{r}}_i}{\sum g_i} \tag{19}$$

where $\hat{\boldsymbol{r}}_i = -\hat{\boldsymbol{V}}_i$ are the unit vectors to the loudspeakers. In its original form $\boldsymbol{r}_V$ is defined with real valued gains. However here we extend to complex valued $\boldsymbol{r}_V$, with complex valued gains. The constraints (16) can then be written

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{R}} \cdot (\Re(\boldsymbol{r}_V) - \hat{\boldsymbol{r}}_I) = 0 \tag{20}$$

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{R}} \cdot (\Im(\boldsymbol{r}_V) + \frac{\hat{\boldsymbol{r}}_I}{k r_I}) = 0 \tag{21}$$

We now show how the constraints can be satisfied using stereo, that is two loudspeaker reproduction. To simplify the calculation we impose the additional constraint

$$g_1 + g_2 = 1 \tag{22}$$

This does not restrict the solution search in practice since given any solution a solution satisfying the additional constraint exists by dividing gains by $(g_1+g_2)$, and the original solution can be found from this. The new constraint allows the constraints (20, 21) to be written in terms of separate sets of variables $(\Re(g_1),\Re(g_2))$ and $(\Im(g_1),\Im(g_2))$. The constraint (22) implies

$$\Re(g_1)+\Re(g_2) = 1 \tag{23}$$
$$\Im(g_1)+\Im(g_2) = 0 \tag{24}$$

hence,

$$\Re(\boldsymbol{r}_V) = \Re(g_1\hat{\boldsymbol{r}}_1 + g_2\hat{\boldsymbol{r}}_2) = \Re(g_1)(\hat{\boldsymbol{r}}_1 - \hat{\boldsymbol{r}}_2) + \hat{\boldsymbol{r}}_2 \tag{25}$$
$$\Im(\boldsymbol{r}_{V_3}) = \Im(g_1\hat{\boldsymbol{r}}_1 + g_2\hat{\boldsymbol{r}}_2) = \Im(g_1)(\hat{\boldsymbol{r}}_1 - \hat{\boldsymbol{r}}_2) \tag{26}$$

Substituting (25) in (20) gives the real gains, which were calculated in previous work[2] . The solution fails when the loudspeakers are symmetrically at the side of the listener and $\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_1 - \hat{\boldsymbol{r}}_I) = 0$.

$$\Re(g_1) = \frac{\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_I - \hat{\boldsymbol{r}}_2)}{\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_1 - \hat{\boldsymbol{r}}_2)} \tag{27}$$
$$\Re(g_2) = \frac{\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_I - \hat{\boldsymbol{r}}_1)}{\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_2 - \hat{\boldsymbol{r}}_1)} \tag{28}$$

The imaginary gains are similarly found by substituting (26) in (21),

$$\Im(g_1) = -\Im(g_2) = \frac{\hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_I}{kr_I \hat{\boldsymbol{r}}_R \cdot (\hat{\boldsymbol{r}}_1 - \hat{\boldsymbol{r}}_2)} \tag{29}$$

We see that the imaginary part of the gains, $j\Im(g_i)$ are frequency dependent and proportional to $1/(jk)$, constituting an integrating filter. This can be approximated with a simple one pole low pass filter with sufficiently low cutoff frequency. The phase response of this filter is not constant up to Nyquist, however the region of interest up to $1000Hz$ is well below Nyquist with typical sampling rates $\approx 40000Hz$, and so is approximately constant in this region.

## 5 Reproduction for very near images

The approximation discussed in the previous section is valid for long wavelengths where the pressure and gradient dominate higher field derivatives. This is useful because ILD is perceptually significant up to 1-2m from the listener and the ears are approximately 0.07 m from the centre of the head.

However when the source is close to the ear compared with the head radius the higher derivatives become significant, (6) and (7) are no longer accurate for describing the target source field (the binaural signal becomes infinite when the source is at an ear). On the other hand these equations

remain valid when applied to the panned field, which consists of the summation of two plane waves (or several plane waves in general). The ILD and ITD can be given according to more accurate model for the target. According to the argument in Section 3 ILD and ITD are sufficient to define the shape of Fig. 3, and the ratios in (13). Applying the dot product of $\hat{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{R}}$ to (25) and (25) allows the left side to written in terms of the ratios from (13). Rearranging for $\Re(g_1)$ and $\Im(g_1)$ provides the solution for the panned image.

The ratios can be found from the pair (ITD, ILD) as follows. Fig. 4 illustrates the variables now used. The length $P$ in Fig. 3 is represented here with length 1 for simplicity.

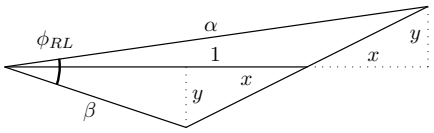



Figure 4: Illustrates variables used in geometric calculation of ratios from ITD and ILD.

The definition of ILD is

$$\text{ILD} = \frac{\alpha}{\beta} \tag{30}$$

Trignometric identities give

$$\alpha^2 = (1+x)^2 + y^2 \tag{31}$$

$$\beta^2 = (1-x)^2 + y^2 \tag{32}$$

$$4(x^2+y^2) = \alpha^2 + \beta^2 - 2\alpha\beta\cos(\phi_{RL}) \tag{33}$$

Where $\phi_{RL} = \omega\text{ITD}$. Adding (31),(32) provides an expression in $\alpha, \beta$ for $(x^2+y^2)$ which can be substituted into (33). Using (30) the result can be written as a quadratic equation for $\alpha$ or $\beta$. $x$ is then given by subtracting (31),(32), and $y$ then e.g. from (31),

$$x = \frac{1}{4}(\alpha^2 - \beta^2) \tag{34}$$

$$y = \sqrt{\alpha^2 - (1+x)^2} \tag{35}$$

$x, y$ are the ratios required in the first part of this section. This will generally lead to the real and imaginary parts of the gains having complex dependence on $k$, and so be much more costly to implement compared with the integrating filter identified in Section 4.

## 6 Conclusion

It has been shown how the previous work reproducing panned images with compensation for head rotation can be extended for near images. An efficient formulation has been found that is valid provided the image is not very near.

While the ITD cue is limited to low frequencies, the ILD cue is not, and interference is expected from conflicting high frequency ILD. Transaural methods can be considered for the control of high frequencies. The advantage of the current approach for low frequencies compared with such methods is that we do not attempt to control the ears individually, which is inherently difficult at low frequencies. Also the head size $r$ drops out of the calculations and is not required.

The approach has already been shown effective experimentally for far images. Further experimental work will be needed to investigate the effectiveness of the near field formulation.

## Acknowledgment

This work was supported by the EPSRC Programme Grant S3A: Future Spatial Audio for an Immersive Listener Experience at Home (EP/L000539/1) and the BBC as part of the BBC Audio Research Partnership. No new data were created during this study

## References

[1] F. Fazi and D. Menzies, “Estimation of the stability of a virtual sound source using a microphone array,” in *Proc. 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), Florence*, July 2015.

[2] D. Menzies and F. Fazi, “A theoretical analysis of sound localisation, with application to amplitude panning,” in *Proc. AES 138th Convention, Warsaw*, May 2015.

[3] M. Simon, D. Menzies, F. Fazi, T. de Campos, and A. Hilton, “A listener position adaptive stereo system for object based reproduction,” in *Proc. AES 138th Convention, Warsaw*, May 2015.

[4] P. Morse and K. Ingard, *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, 1968.

[5] B. Xie, *Head-related transfer function and virtual auditory display*. J Ross, 2013.

[6] E. Williams, *Fourier Acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography*. Elsevier, 1999.

[7] J. Blauert, “Spatial hearing,” 1983.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CONVERSOR AUDIO-IN MIDI-OUT EN TIEMPO REAL

43.60.HJ

Autor/es: Bañuls Juan, Xavier[1] ; Ramos Peinado, Germán[2].
Institución: Universitat Politècnica de València
Dirección: Camino de Vera s/n, 46022
Población: Valencia
País: España
Tel: (+34) 96 387 70 00
Fax: (+34) 96 387 90 09
E-Mail (1): xavilaraiz@gmail.com
E-Mail (2): gramosp@eln.upv.es

## ABSTRACT

In order to carry out a real time conversion of an audio signal and therefore obtaining a MIDI signal output, which is related to the frequency information of the input signal, an audio plug-in software has been designed called MConverter. This plug-in uses the Fast Fourier Transform (FFT) to obtain the harmonic spectrum of the input and a series of algorithms and processes that complete and guarantee the reliability of the result and therefore, enable its use in real-time applications.

## RESÚMEN

Con el objetivo de realizar una conversión en tiempo real de una señal de audio, con la consiguiente obtención de la señal MIDI de salida, relacionada con la frecuencia de la señal de entrada, se ha diseñado un plugin de audio denominado *MConverter*. El plugin utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para la obtención del espectro armónico de la señal de entrada y una serie de algoritmos y procesos que aseguran la fiabilidad de los resultados, posibilitándose así el uso práctico del mismo en aplicaciones de tiempo real.

## ANTECEDENTES

El estudio de mercado realizado en el ámbito de la conversión Audio-MIDI en tiempo real y las carencias detectadas en instrumentos de viento como el Trombón son el origen del presente trabajo. La existencia de utilidades prácticas aplicables a este tipo de conversión como la escritura dinámica de partituras musicales y la síntesis con instrumentos VST [1] evidencian la necesidad de diseño de una aplicación que ofrezca resultados fiables y robustos.

De entre las existentes aplicaciones destacan *TS-AudioToMidi Converter* [2] y *WIDI Professional 4.0* [3]. El funcionamiento de estas se centra en la obtención del espectro armónico de la señal por medio de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Una vez obtenido dicho espectro armónico toman como medida de la frecuencia fundamental (Fo) que dará nombre a la nota MIDI [4] que comunicarán a la salida el pico absoluto del espectro. Este resultado que ofrecen no necesariamente será correcto debido a la propia definición de *timbre* de los instrumentos, pues dependiendo de qué instrumento se trate, su espectro armónico

variará y con él la disposición de sus picos. Por tanto, hay situaciones en las que el pico máximo absoluto del espectro armónico de una señal no necesariamente coincide con su frecuencia fundamental. Como ejemplo de ello, en la Figura 1 podemos observar el espectro de una nota de Trombón.

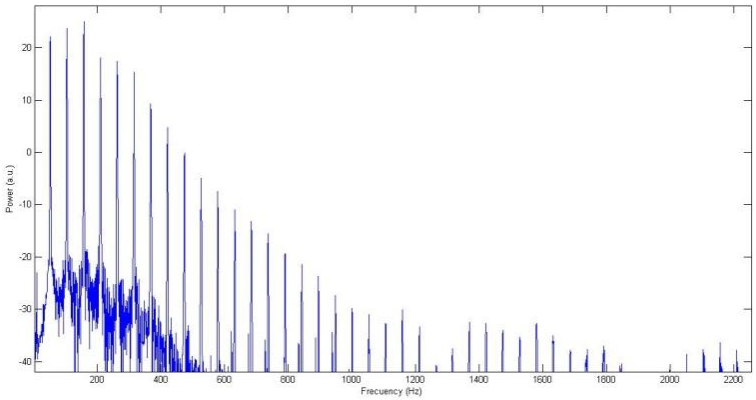



*Fig. 1. Ejemplo de espectro armónico de una nota interpretada por el trombón.*

Para paliar este posible error al considerar el máximo absoluto, las aplicaciones mencionadas ofrecen la posibilidad de una ecualización para atenuar las frecuencias indeseadas, con la intención de que el usuario acote el rango de frecuencias empleado. Esta solución adoptada, aunque a simple vista pueda parecer que aporta versatilidad al poder realizar una ecualización distinta para cada caso, lo que realmente aporta es una limitación en el rango de uso de la banda de frecuencia, pues la ecualización debe empezar a atenuar desde los primeros armónicos de la nota más grave que va a interpretarse, cosa que reduce considerablemente el rango frecuencial útil del programa.

Esta limitación puede que para instrumentos de registro agudo no parezca excesivamente severa desde el punto de vista de la frecuencia, pues cuanto mayor sea la nota grave límite impuesta por el instrumento, mayor será la medida de Fo y, como consecuencia, mayor será el ancho de banda hábil. El rango de notas musicales que se podrían procesar correctamente se mantiene independientemente de su frecuencia, pero se amplía el ancho de banda cuanto más agudas sean. La consecuencia directa es que la separación de las notas en Hercios es mayor, lo que facilita la distinción de una u otra nota al estar más espaciadas en el abanico frecuencial. Esto se traduce de forma inversa en una clara dificultad añadida para los instrumentos de registro grave, donde la separación entre las notas en el ámbito de la frecuencia se reduce considerablemente. Dicha reducción implica directamente un funcionamiento deficiente de estos programas para los instrumentos con registro más grave.

Las limitaciones que acarrean los productos existentes en el mercado actual en instrumentos de viento como el Trombón han hecho evidente la necesidad de modificar los algoritmos existentes para permitir realizar conversiones Audio-MIDI con una mayor fiabilidad y un rango frecuencial más amplio además de instrumentos cuya frecuencia fundamental no sea la del armónico con más energía.

Por tanto, se va a elegir como instrumento para los experimentos el trombón de varas. Por una parte, su registro grave ayudará a crear un algoritmo que solucione el problema de los instrumentos próximos a este registro y a su vez pueda funcionar perfectamente para instrumentos de registro más agudo. Por otra parte, como se aprecia en la Figura 1, los picos máximos del mismo, por norma general, no coinciden con la frecuencia fundamental del sonido analizado [5].

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el de diseñar e implementar un plugin de audio que consiga realizar la conversión Audio-MIDI en tiempo real que se pueda emplear en un amplio rango de frecuencias y tipos de instrumentos. Esta conversión ha de asegurar unos resultados fiables y acordes a la nota fundamental de la señal de entrada, además de minimizar la latencia de proceso para permitir su uso en aplicaciones de tiempo real.

La señal de entrada para el diseño de la aplicación será monofónica e interpretada por un trombón de varas. Los resultados de la conversión para dicha entrada han de ser válidos para todo su rango de frecuencias que va entre los 73 y los 587 Hercios, mientras que su rango frecuencial de armónicos sería de 1-4KHz, por lo que se tomarán en los experimentos como frecuencias de corte inferior y superior 40Hz y 4.2KHz correspondientemente.

La aplicación deberá tener en cuenta el error humano asociado al instante de la emisión de los sonidos -*picado* en música- y proponer una solución para las sobreoscilaciones y el ruido que aparecen en los transitorios de cada nota típicos de este tipo de instrumentos, que es justamente lo que los hace fallar con los conversores Audio-MIDI probados. Se ha elegido emplear el formato de plugin VST [1] para facilitar su posterior inclusión en cualquier programa Host que se encargue de la entrada de audio y síntesis posterior.

## ESTUDIO PREVIO

De manera previa a la programación en tiempo real del plugin se ha realizado un estudio *offline* sin tener en cuenta la restricción de latencia impuesta, donde se comparan diversos algoritmos de obtención de la frecuencia fundamental, todos ellos basados en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el uso de la autocorrelación.

Para las pruebas se emplearon grabaciones de audio interpretadas por el trombón de varas que abarcaran todo su rango frecuencial útil. A una misma grabación se le aplicaron todos los algoritmos de detección de pitch programados y se compararon los resultados.

Los métodos empleados en este estudio previo y que se compararán a continuación son el algoritmo de autocorrelación y el algoritmo FFT simple con dos variantes en el criterio de elección de la fundamental: la elección de la frecuencia fundamental como el pico del espectro de la señal correspondiente a la menor frecuencia, y la media de las distancias entre picos consecutivos de dicho espectro, la denominada distancia espectral.

Al trabajar con frecuencias bajas del Trombón, cabe la posibilidad de que al acercarse al límite más grave de su rango, el pico relativo de menor frecuencia del espectro pueda confundirse con el propio ruido de la señal y enturbiar los resultados, induciendo inevitablemente a la elección de una Fo errónea. Por este motivo se descarta el algoritmo de elección de Fo como el pico relativo de menor frecuencia en favor del algoritmo de elección de Fo como la media de las distancias entre picos relativos del resultado de la FFT, pues aunque tratemos de convertir notas graves donde el pico correspondiente a la Fo se confunda, la disposición de los armónicos en el espectro de la señal nos dará el resultado correcto.

Con el fin de determinar el algoritmo más adecuado para la presente aplicación se ha tomado como señal de entrada la grabación de una escala musical a más de dos octavas que abarca todo el rango hábil del trombón. Se ha desarrollado un programa que ejecuta el algoritmo de autocorrelación para la obtención del pitch de las notas de la escala, que además . procesa la misma señal de entrada con otro programa que basa su funcionamiento en la FFT simple, con el fin de obtener unos resultados y comparaciones de forma eficiente.

Algoritmo de Autocorrelación:

El programa desarrollado sobre Matlab® emplea la autocorrelación como herramienta para la obtención del pitch de la señal de entrada. Tras las pertinentes pruebas para el ajuste de los parámetros se han establecido una serie de valores recomendados para la obtención de la gráfica que servirá de comparativa. Se tomará una ventana de análisis de 30ms con un desplazamiento del 50%. La frecuencia de muestreo se fijará en 44100Hz. El número de puntos para realizar la FFT se establece en 4096. Con el fin de filtrar el ruido se aplicará un umbral de sonoridad de valor 0.3. Finalmente se fijan las frecuencias de corte inferior y superior en 40 y 4.200Hz respectivamente. [7]

La gráfica obtenida con los valores recomendados propuestos es la siguiente, apreciando que en general se obtiene el valor correcto de la frecuencia, pero con muchos fallos puntuales:

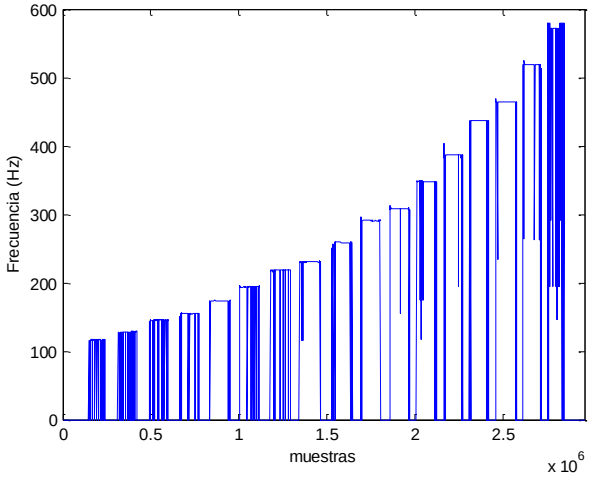



*Fig. 2. Resultado algoritmo de autocorrelación.*

Algoritmo FFT simple con medida Fo = distancia entre picos consecutivos:

Análogamente al algoritmo de autocorrelación se emplea otro programa que emplea la FFT y obtiene el pitch de la información que proporciona la distribución de los armónicos en el espectro generado. Del mismo modo se han elegido unos valores recomendados para los parámetros del programa, acordes al anterior análisis para que los resultados sean ilustrativos y comparables. La ventana de análisis será de 30ms con desplazamiento del 50%. La frecuencia de muestreo de nuevo tendrá un valor de 44100Hz. Se usará un tipo de ventana *Hamming* para el procesado. Para la selección de máximos relativos considerados como picos del espectro de la señal correspondientes a los armónicos de la misma se define un umbral. Se considerarán picos del espectro todo máximo relativo que supere dicho umbral. Este parámetro equivale al producto del máximo absoluto de la correspondiente FFT y un valor n<1 que decidirá cuán cerca del máximo se halla el umbral. El valor recomendado para el umbral es de 1/3 del máximo absoluto del espectro obtenido en cada caso. Se filtrará el ruido del mismo modo que en el anterior algoritmo, por medio de un umbral de sonoridad fijado a un valor de 0.3. Por último se acotan del mismo modo las frecuencias de corte otorgando un rango frecuencial de [40,4200]Hz.[6].

Con los valores señalados se obtiene la gráfica de la Figura 3, bastante más estable que los obtenidos con la autocorrelación (Figura 2).

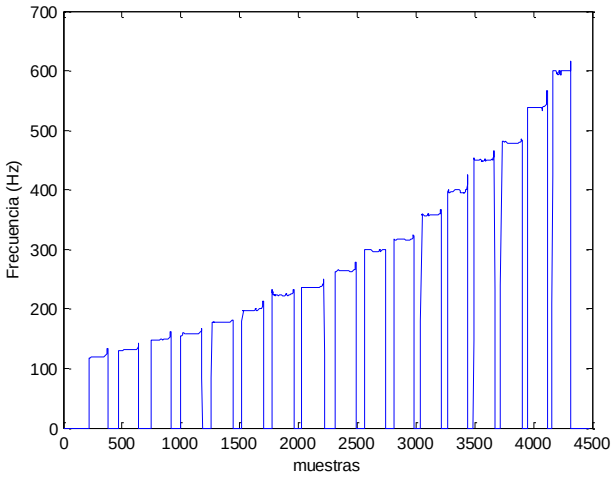



*Fig. 3. Resultado FFT simple con medida Fo = distancia entre picos consecutivos.*

## COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

A la vista de las gráficas obtenidas, cabe comentar lo siguiente. Por una parte habrían de analizarse las bandas pasantes de cada nota. En el caso de la autocorrelación las oscilaciones alrededor de la frecuencia correspondiente a la nota musical interpretada a la entrada son muy pequeñas, pero existen saltos a frecuencias alejadas de la deseada difíciles de corregir, especialmente en los tramos extremos (para las notas más graves y agudas del rango hábil del instrumento). En el caso de la FFT simple las oscilaciones alrededor del punto correspondiente a la frecuencia asociada a la nota de entrada son más evidentes, pero en este caso no aparecen saltos a frecuencias alejadas. Estas oscilaciones alrededor de la frecuencia de la nota se deben a la fluctuación del aire al ser emitido el sonido por parte del intérprete y son algo normal que aparecerá inevitablemente en este tipo de instrumentos. Su corrección es muy sencilla, simplemente redondeando a la nota musical más cercana. En este aspecto el funcionamiento de la FFT simple es mejor que el del algoritmo de autocorrelación.

Por otra parte se debe estudiar los flancos de subida y bajada de cada nota y las posibles sobreoscilaciones. En el caso de la FFT simple hay muchas de las notas que tienen sobreoscilaciones ya sea al inicio o al final de la banda de la nota, mientras que en el algoritmo de autocorrelación aparecen en menor medida. Estos picos hallados en los límites de las bandas de las notas se deben, una vez más, tanto al error humano como a la propia naturaleza de instrumentos de viento-metal como el trombón de varas, ya que en el instante de la emisión de la nota, así como en el instante del corte de la misma, pueden aparecer perturbaciones debidas a una incorrecta posición de la lengua al golpear el paladar.

Se puede extrapolar de este análisis que el algoritmo de autocorrelación suaviza en mayor medida las perturbaciones ocasionadas por el error humano, pero funciona bastante peor que el algoritmo FFT simple en las bandas pasantes de las notas debido a la aparición de saltos puntuales a frecuencias alejadas de la deseada. Por ello el algoritmo que se desarrollará para el plugin será el FFT simple.

## CRITERIO DE ELECCIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL

Para obtener la medida de la frecuencia fundamental a partir de la distancia entre armónicos consecutivos será necesario almacenar en un vector todos los máximos relativos del espectro de la señal. Como condición de máximo relativo se establece que ha de ser mayor que un umbral de amplitud. Este umbral se definirá en función del máximo absoluto. El valor del

umbral se va a introducir como parámetro en la interfaz gráfica, para que pueda adaptarse según las exigencias de la señal de entrada.

Una vez guardados en memoria todos los picos relativos, se ordenarán de menor a mayor en función de su posición, no de su amplitud. Es decir, el índice del máximo relativo correspondiente a la menor frecuencia se hallará en la posición 0 del vector, mientras que el índice del máximo relativo del armónico de mayor frecuencia se situará en la última posición.

La frecuencia fundamental coincide con la distancia entre armónicos consecutivos, su distancia espectral. Este será el criterio que servirá de base para el algoritmo. Se hará uso del vector de índices comentado. No obstante, no todos los índices serán válidos. Habrá algunos casos en los que entre índices consecutivos exista otro armónico, cuyo pico no supere el umbral y no se haya almacenado. En estos casos, la distancia entre picos será el doble.

Se estudiarán en detalle las distancias espectrales entorno al pico máximo absoluto. Se asume que una única medida de distancia entre picos no es suficiente para afirmar con seguridad que se trata de Fo. Con estas premisas, el primer paso será estimar una medida inicial de Fo. Esta medida inicial será la que se use para comprobar si se repite a lo largo del espectro o si no lo hace. Para la primera estimación de Fo se mide la distancia entre el índice del pico máximo absoluto y su armónico consecutivo, tanto por arriba como por abajo. Estas dos medidas se comparan. Si son coincidentes, aplicando un rango de tolerancia (tolerancia óptima hallada alrededor del 1%), se toma como medida inicial de Fo la media aritmética entre estas dos distancias. En el caso que no coincidan, se toma como estimación de Fo la de menor valor, pues si alguna de las dos medidas se ha saltado un armónico será la de mayor módulo.

Para ilustrar esta primera estimación de frecuencia fundamental se ha simulado un espectro aleatorio. En él se aprecia que el pico máximo absoluto se halla en el armónico 3 y que el umbral de amplitud está situado al 20% de dicho pico. Puesto que los armónicos 2 y 4 superan el umbral y las distancias entre armónicos 2-3 y 3-4 son equivalentes y de módulo 10, la primera estimación de Fo será igual a 10. Se simulará otro espectro aleatorio a continuación donde uno de los armónicos consecutivos al pico máximo absoluto no supere el umbral.

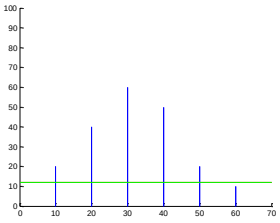



*Fig. 4. Espectro aleatorio 1.*

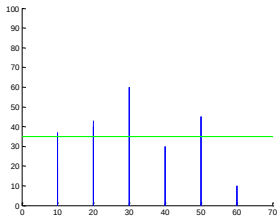



*Fig. 5. Espectro aleatorio 2.*

En este segundo caso, la medida entre el pico máximo y se pico consecutivo inferior será de módulo 10, mientras que la distancia entre dicho máximo absoluto y su consecutivo por la derecha que supere el umbral será de módulo 20 (el armónico 4 no se almacenaría por no superar el umbral). El criterio de estimación de Fo tomaría la menor de las distancias, es decir, la de módulo 10. La estimación sería correcta.

Existen más casos posibles. Si no superara el umbral ningún armónico por la derecha del pico absoluto, pero sí por la izquierda, la estimación sería la distancia entre el pico y su armónico anterior y viceversa.

El restante caso, en el que no hay ningún armónico que supere el umbral, inhabilitaría el uso de este algoritmo, por lo que se habría de tomar como Fo definitiva el pico absoluto, aunque lo recomendable sería decrementar el valor del umbral.

Una vez se tiene la estimación de Fo almacenada en memoria, el algoritmo procederá a comprobar cuántas veces se repite esta medida a lo largo del vector donde se han ordenado los índices de los picos relativos, es decir, donde se ha almacenado el valor de los armónicos. El número de repeticiones de dicha medida se almacenará en una variable que servirá como coeficiente de seguridad. Si este coeficiente es mayor que 1, es decir, si al menos se ha repetido una vez la medida de Fo estimada, el valor de Fo estimado será válido. Para una mayor precisión, se hará la media aritmética de Fo y sus repeticiones, aunque para una tolerancia del 1% la variación será mínima, pero siempre más precisa. En el caso de no haberse cumplido la condición de que el coeficiente de seguridad sea mayor que 1, no se puede tomar este algoritmo como válido y se establecerá como Fo el pico relativo asociado a la menor frecuencia. Cuando solamente haya un pico que supere el umbral, este coincidirá con el pico absoluto.

Analizando de nuevo los espectros aleatorios anteriores, en el primer caso la estimación de Fo sería de valor igual a 10, y esta distancia se repetiría 4 veces a lo largo del vector, por lo que Fo definitiva sería también de valor 10 y se podría asegurar que es una medida correcta. En el segundo caso, la Fo estimada sería 10 también y esta distancia se repetiría una vez más a lo largo del vector, con lo que el coeficiente de seguridad valdría 2 y la Fo definitiva sería correcta y de valor 10.

En definitiva, el algoritmo empleado para la elección de la Fo tendrá un buen funcionamiento si previamente a su uso se ha hecho un correcto calibrado del umbral de amplitud para que se contemplen suficientes máximos relativos en los cálculos.

## FILTRADO DE LA SEÑAL

Con la finalidad de eliminar las perturbaciones halladas en la señal tras la ejecución del algoritmo FFT simple, ilustradas en la Figura 3, se han diseñado una serie de filtros. Nuevamente se realiza el diseño de los mismos de un modo *offline* sin tener en cuenta la restricción de latencia impuesta.

Para aplanar las bandas de las notas y eliminar las oscilaciones indeseadas se realiza un primer filtrado cuyo funcionamiento reside en la interpretación de las frecuencias con relación a las notas musicales. Cuando la frecuencia que se esté analizando no coincida con la asociada a una nota musical el filtro actuará de tal modo que dicha frecuencia tome el valor de la frecuencia asociada a la nota musical más próxima. El resultado es el siguiente:

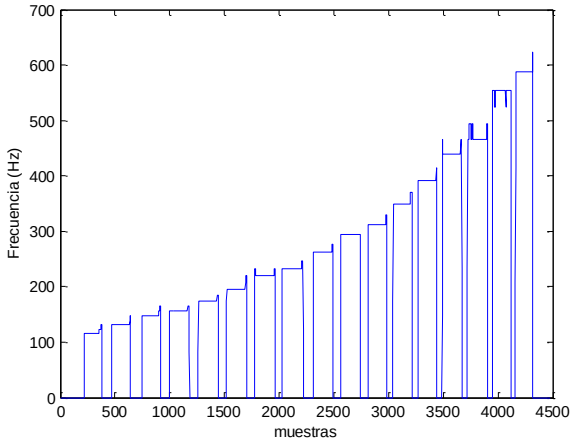



*Fig. 6. Resultado tras aplicar el filtro de corrección de frecuencia en función de las notas.*

Se consigue así normalizar las zonas estacionarias de cada nota. Sin embargo, todavía faltaría por eliminar los transitorios que aparecen generalmente al principio y/o final de cada

nota. Para ello se introduce un último filtro. En este caso, el algoritmo recorrerá el vector de datos de inicio a fin, parándose para cada situación de cambio de frecuencia y se comprobarán los instantes siguientes a dicha situación. Si la nueva frecuencia se mantiene un número de muestreos igual al parámetro introducido como condición de cambio de nota, se mantendrá el cambio de frecuencia. Si, por contra, el cambio frecuencial es de duración menor a dicho parámetro, la nueva frecuencia se descartará y se mantendrá el valor que había antes de dicho cambio. Con ello se eliminarán los saltos frecuenciales de menor duración que el parámetro introducido como condición de cambio de nota. Tomándose como condición de cambio de nota que se mantenga la nueva frecuencia 10 muestreos consecutivos -valor adaptado a la señal de entrada que se está procesando en los análisis aquí expuestos- se consiguen eliminar todas las perturbaciones y se obtiene así la señal deseada a la salida del algoritmo.

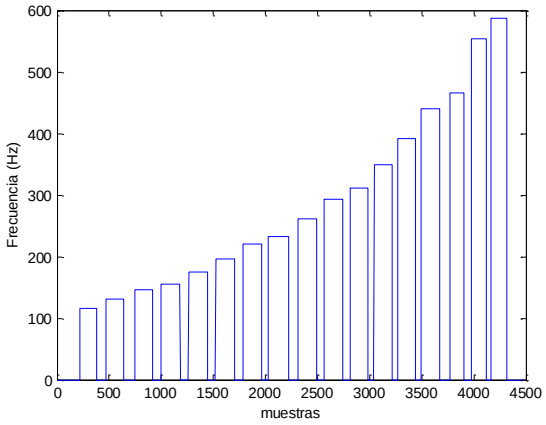



*Fig. 7. Resultado punto óptimo con filtro de sonoridad, de mediana, corrección frecuencial en función de las notas y filtro corrector de saltos puntuales.*

Con esto se ha conseguido obtener un resultado perfectamente afín a la señal de entrada y se han diseñado los filtros necesarios para dicho fin, con lo que es el momento de pasar al análisis en tiempo real.

## PROCESADO Y FUNCIONAMIENTO DEL PLUGIN

Como todo plugin de audio, *MConverter* tiene un módulo editor y un módulo procesador. El editor sirve como interfaz gráfica y es el encargado de comunicar al procesador el valor de los parámetros introducidos por el usuario. El procesador es el encargado de recibir los paquetes de datos, almacenarlos en un buffer, realizar las pertinentes transformaciones y filtrados a los mismos y enviar los resultados a la salida. Esta serie de operaciones se realiza cada vez que el programa Host envía un paquete de datos al plugin, cosa que sucede de forma regular y continua en el funcionamiento normal de la aplicación. A continuación se describen los pasos que realiza el procesador para cada llegada de paquete de datos:

1. Lectura del paquete de datos de entrada y almacenamiento de los mismos en un buffer circular.
2. Llamada a la función encargada de la obtención de la FFT y elección de la frecuencia fundamental correspondiente.
3. Post procesado. Aplicación de filtros correctores y otras modificaciones aplicables a los resultados del anterior punto.
4. Comunicación de los resultados por el canal MIDI.
5. Actualización de las variables.

Dentro del post procesado que se menciona en el punto 3 se incluirían los filtros diseñados del siguiente modo:

1. Codificación MIDI. Conversión de la información frecuencial en hercios a la codificación de notas MIDI. De este modo se corrigen las desafinaciones y se eliminan las oscilaciones alrededor de notas. Esta transformación atiende a la siguiente expresión:

```
noteMIDI = round(69.0f + 12.0f * log2f(Fo / 440))
```

2. Filtrado pasa-banda. Tomándose como frecuencias de corte las introducidas por el usuario en el editor, se eliminan y sustituyen por silencios (frecuencia 0Hz) las frecuencias superiores o inferiores a los límites establecidos por los parámetros correspondientemente.
3. Filtrado de sonoridad. Se considera silencio en los casos que no se alcance el nivel de sonoridad (intensidad de la señal) establecido por el parámetro pertinente de la interfaz.
4. Transposición. Se le suma o resta el intervalo en semitonos introducido por el usuario en la interfaz, en caso de haberlo.
5. Retraso corrector. Desde la interfaz el usuario puede indicar si quiere aplicar un retraso corrector al procesado o no y de cuántos instantes quiere aplicarlo. Si se introduce retraso corrector, el plugin esperaría tantos instantes (entendiendo como instante cada vez que llega un paquete de datos y se ejecuta el procesado) como se le haya indicado en la interfaz para comunicar los resultados. Si se han producido cambios de nota de duración menor a la del retraso corrector, estos serán considerados perturbaciones y eliminados en consecuencia, manteniéndose la última nota (o silencio) activa durante los instantes de perturbación.

Estos filtros obtienen sus parámetros de la interfaz, lo que dota al plugin de una gran versatilidad otorga al usuario las herramientas necesarias para adaptar cada filtro a sus exigencias.

## INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Para otorgar versatilidad al programa y posibilitar la adaptación del mismo a las necesidades del usuario se ha creado una interfaz gráfica desde la que se posibilita la modificación de los parámetros siguientes:

- Midi Vol: Control del volumen de la salida MIDI. Rango [0,127].
- min Frec: Frecuencia de corte mínima. Rango [0,6.000] Hz.
- Max Frec: Frecuencia de corte máxima. Rango [1.000,12.544] Hz.
- Resolution: Resolución de la FFT. Rango [100,10.000] samples.
- Amp Filter: Umbral del filtro de sonoridad. Rango [0,500].
- Peak Filter: Umbral para el criterio de selección de picos relativos, medido en % respecto al pico máximo. Rango [0,100] %.
- s.Tone U/D: Intervalo a transportar la salida MIDI en semitonos Rango [-24,+24].
- Corr Delay: Retraso corrector de saltos puntuales. Rango [0,60].

En la siguiente figura se puede visualizar la interfaz gráfica de usuario del plugin en su estado por defecto.

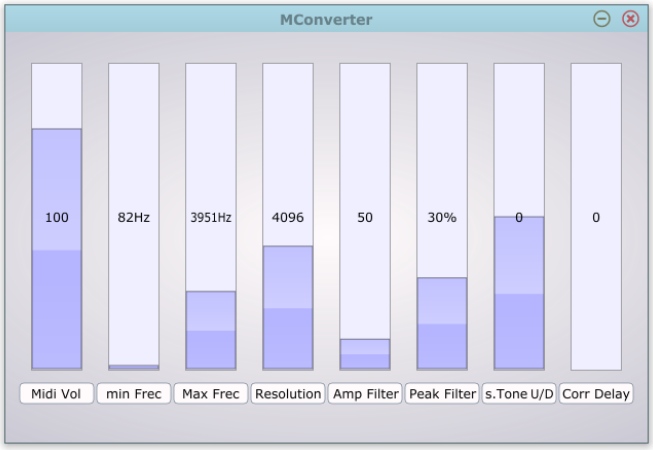



*Fig. 8. Interfaz gráfica de usuario de MConverter.*

## CONCLUSIONES

Si se realiza una correcta inicialización del programa, de modo que se hagan las pruebas pertinentes con el instrumento para adaptar los parámetros de la interfaz al ámbito de uso del mismo, el plugin funciona perfectamente.

Por otra parte, la condición de *en tiempo real* impuesta se ha logrado con una eficacia notable, puesto que la latencia que se ha medido en los experimentos realizados es de unos 20ms para una resolución de 4096 muestras.

Para paliar con el error humano se ha desarrollado el concepto de retraso corrector. Aunque el uso del mismo atentaría a la condición temporal impuesta, con él se consigue eliminar toda perturbación de la señal de entrada, de modo que dependiendo del uso que se le esté dando al plugin, puede ser o no beneficioso. Por ejemplo, para *loops* en los que no se necesita escuchar la conversión en tiempo real, sino cuando se repite el *loop*, es muy útil esta herramienta combinada con una compensación de pista adecuada.

## REFERENCIAS

[1] http://www.steinberg.net
[2] http://www.ts-audiotomidi.programas-gratis.net
[3] http:// http://www.widisoft.com
[4] http://www.css-audiovisual.com/areas/guias/midi.htm
[5] Menzies-Gow D., An investigation into the design of musical performance instruments. Music Technology MSc, University of York, 1995.
[6] Rocchesso D., Introduction to Sound Processing, Università di Verona, Dipartimento di Informatica.
[7] Zölzer U., DAFX: Digital Audio Effects, Second Edition. Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, John Wiley & Sons, 2011. Ltd. ISBN: 978-0-470-66599-2.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ECUALIZADOR GRÁFICO DE 8 BANDAS

PACS: 43.38.-p

Romo, William; Herrera Martínez, Marcelo
Universidad de San Buenaventura,
Carrera 8 H n.° 172-20 | PBX: (57) 1- 667 1090
Bogotá, Colombia
mherrera@usbbog.edu.co

**Resumen**
Un ecualizador está formado por una conexión de filtros en paralelo donde cada uno de ellos se encarga de modificar la respuesta en frecuencia de una parte la banda audible. Este artículo presenta un diseño del ecualizador de 8 (ocho) bandas y algunos resultados objetos de la prueba tras finalizar el montaje.

## Introducción

El presente artículo muestra el proceso detallado para llevar a cabo la construcción del ecualizador gráfico de 8 bandas, el diseño y la elaboración de un ecualizador gráfico de 8 bandas. Un ecualizador gráfico principalmente se reconoce como un dispositivo electrónico activo (o pasivo) conformado por filtros conectados en paralelo, cada uno de frecuencia y ancho de banda fijo, pero con la posibilidad de variar su nivel (Millán, 2012). Partiendo de este concepto nos propusimos, a través del método presentado a continuación, diseñar y construir un ecualizador gráfico con ganancias de ±12 dB en cada banda.

## Estructura para la realización de filtros

Con el fin de reducir el número de amplificadores operacionales en los circuitos de los filtros Sallen-Key, se idearon una serie de estructuras capaces de materializar una función cuadrática con polos imaginarios con un solo amplificador operacional. Su formato de conexión básico se encuentra representada por la figura. No. 1.

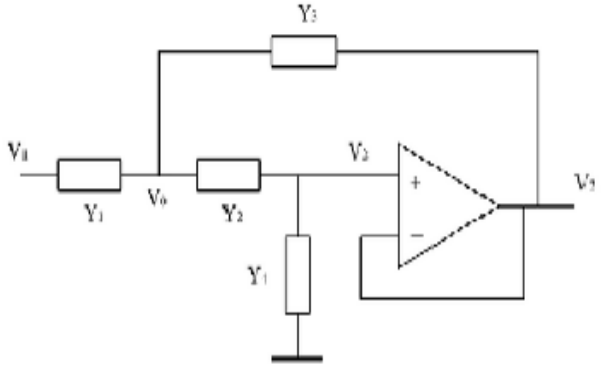


Fig.1. Circuito de la forma Sallen-Key

Existen métodos de síntesis para desarrollar los circuitos, la técnica de resistencia o capacitancia constante fue la escogida para diseñar fácilmente estos filtros.
La forma de los filtros pasa altos y pasa bajo son en esencia las mismas, la diferencia entre uno y otro es el orden de conexión de sus componentes, condensadores y resistores.

**PROCESO DE DISEÑO**

La idea básica, sobre la que se planteó el diseño, fue crear un sistema de filtros pasa banda con control de ganancia, conectados en paralelo, como lo ilustra la figura No. 3. Los filtros pasa banda, son formados por dos filtros conectados en serie, pasa-bajo y pasa-altos respectivamente. Estos son filtros tipo-Butterworth, de segundo orden estructura Sallen-Key.

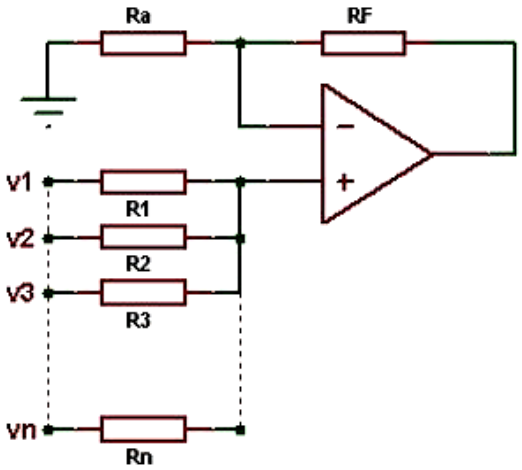



Fig.2. Circuito Sumador no inversor con amplificador operacional.




Fig.3. Diagrama de bloques idea de diseño para el ecualizador gráfico de 8 bandas

Como primer paso, identificamos las frecuencias centrales (Fr) de cada banda, segunda columna tabla 3, que representan el máximo punto de amplitud de la banda de paso del filtro pasa-banda, formado por la conexión en cascada o serie de los filtros pasa-bajo y pasa-alto. La

frecuencia inferior Finf (1), valores columna 1 de la tabla 3, será la frecuencia de corte de los filtros pasa-altos y la frecuencia superior Fsup (2), valores columna 3 de la tabla 3, será la frecuencia de corte de los filtros pasa-bajos.

$$F_I = F_r / \sqrt{2} \qquad (1)$$

$$F_S = F_r * \sqrt{2} \qquad (2)$$

Conociendo las frecuencias inferiores y superiores, para cada banda de octava, el paso a seguir es calcular los valores de los elementos que componen los filtros pasa-altos y pasa-bajos, resistores y condensadores respectivamente.

**Diseño para filtros pasa-bajos**

Con las ecuaciones convencionales de diseño de filtros, se calculan los valores de resistores y condensadores obtenidos son descritos en la tabla 1:

**Tabla 1.** Valores resistores y condensadores por banda para cada filtro pasa bajas.

| Fr (Hz) | C1 | C2 | R1-R2 (Ω) |
|---|---|---|---|
| 31.7 | 50nF | 25nF | 100 K |
| 65 | 25nF | 12 nF | 100K |
| 125 | 10 nF | 12 nF | 120K |
| 250 | 5nF | 2nF | 120K |
| 500 | 318pF | 159pF | 1M |
| 1K | 159pF | 79pF | 1M |
| 2K | 79pF | 39,7pF | 1M |
| 4K | 39pF | 20pF | 1M |

**Diseño de filtros paso-altos**

La frecuencia de corte Fr, para cada uno de los filtros paso-bajos, es la frecuencia inferior Finf (1) de cada banda, ver tabla 2.

**Tabla 2.** Frecuencias centrales, superiores e inferiores, por bandas de octava.

| Banda (Hz) | Frecuencia superior (Hz) |
|---|---|
| 31.5 | 22 |
| 63 | 44 |
| 125 | 88 |
| 250 | 177 |
| 500 | 355 |
| 1000 | 710 |
| 2000 | 1420 |
| 4000 | 2480 |

Con las ecuaciones convencionales se calcula el valor de cada uno de los condensadores para formar los filtros. El procedimiento matemático se encuentra contenido en la parte de anexos al final del documento. Finalmente los valores de resistores y condensadores obtenidos son:

**Tabla 3.** Valores resistores y condensadores por banda para cada filtro pasa altas.

| Banda | C1 | R1 (Ω) | R2 (Ω) |
|---|---|---|---|
| 31.7 | 220nF | 22790 | 45573 |
| 65 | 220nF | 11497 | 22990 |
| 125 | 220nF | 5788 | 11576 |
| 250 | 220nF | 2894 | 5787 |
| 500 | 220nF | 1447 | 2990 |
| 1K | 220nF | 723 | 1446 |
| 2K | 220nF | 361 | 723 |
| 4K | 220nF | 181 | 362 |

**Simulación y prueba de los filtros análogos**

La idea general de la conexión en serie de los filtros es crear un filtro pasa-banda. En el proceso de simulación se pudo comprobar que efectivamente los filtros diseñados, por independiente, se comportan como pasa-altos y pasa bajos y, lo más importante, que en conexión en serie genera un filtro pasa-banda.

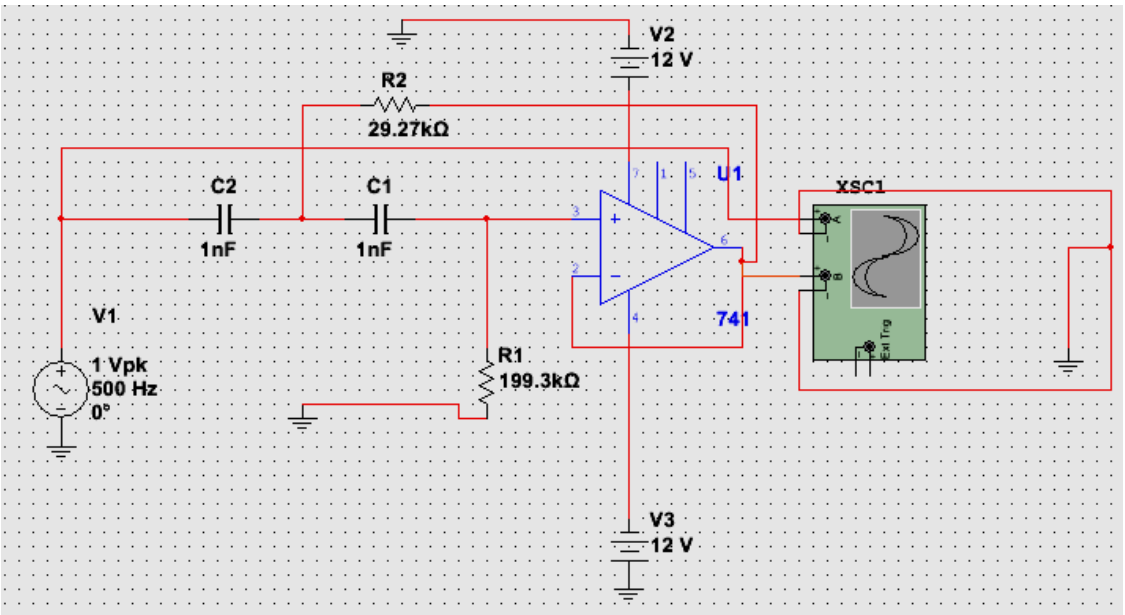



Fig.4. Simulación filtro pasa-altos estructura Sallen-Key

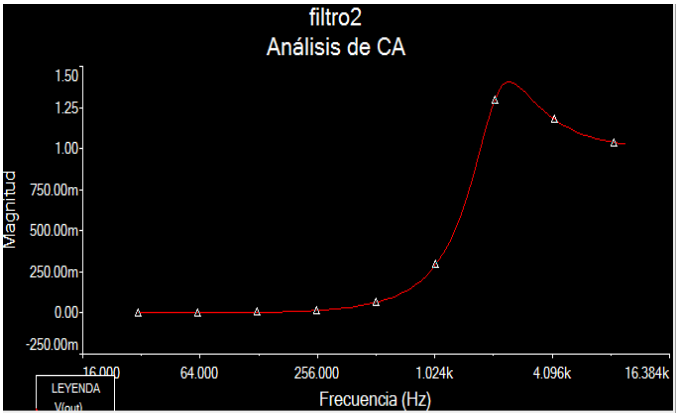



Fig.5. Análisis de la respuesta del filtro pasa alto en corriente alterna

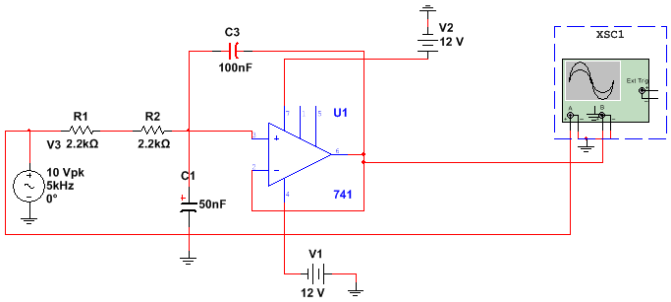



Fig.6. Simulación filtro pasa-bajos estructura Sallen-Key

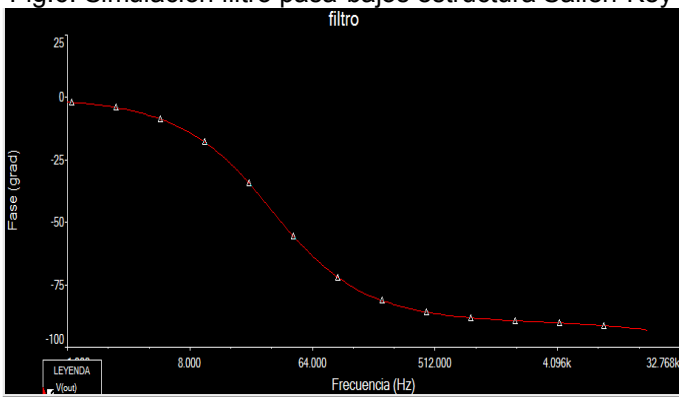



Fig.7. Análisis de la respuesta del filtro pasa-bajo en corriente alterna

Las Fig.4 y Fig.6, muestran el circuito para los filtros paso-alto y paso-bajo, y las Fig. 5 y Fig. 7, su respuesta en corriente alterna. Lo que muestra, la efectividad del filtrado de señales, a partir de la frecuencia de corte con la que fueron diseñados.
La Fig. 8, forma un filtro pasa-banda para la banda de 250 Hz, con los elementos de circuito calculados anteriormente y contenidos en las tablas 5 y 7 para dicha banda.
Finalmente probamos el montaje del filtro pasa-banda sumada a la etapa de ganancia, es decir al amplificador inversor.

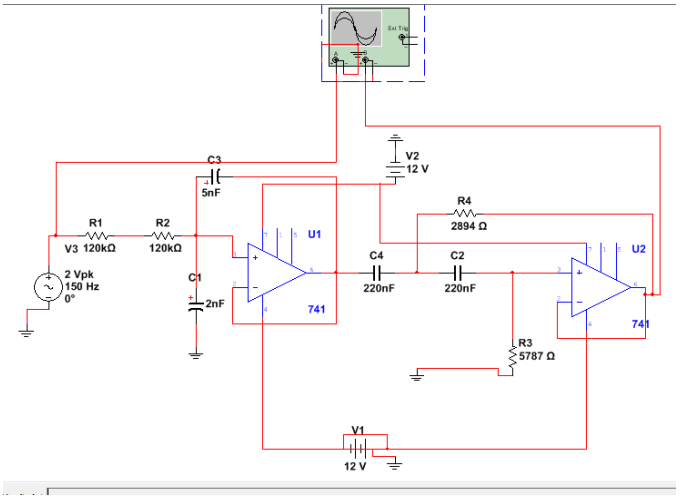



Fig. 8. Simulación filtro pasa-altos y pasa-bajos conectados en serie

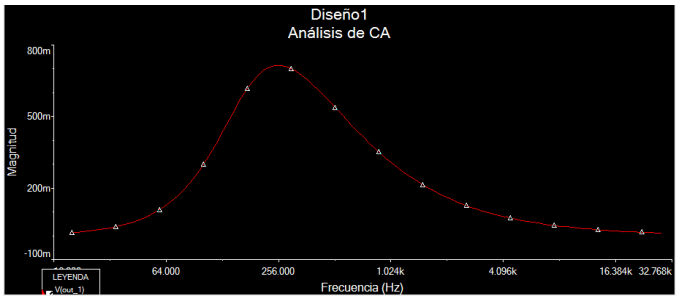



Fig. 9. Análisis de la respuesta del filtro pasa-banda en corriente alterna

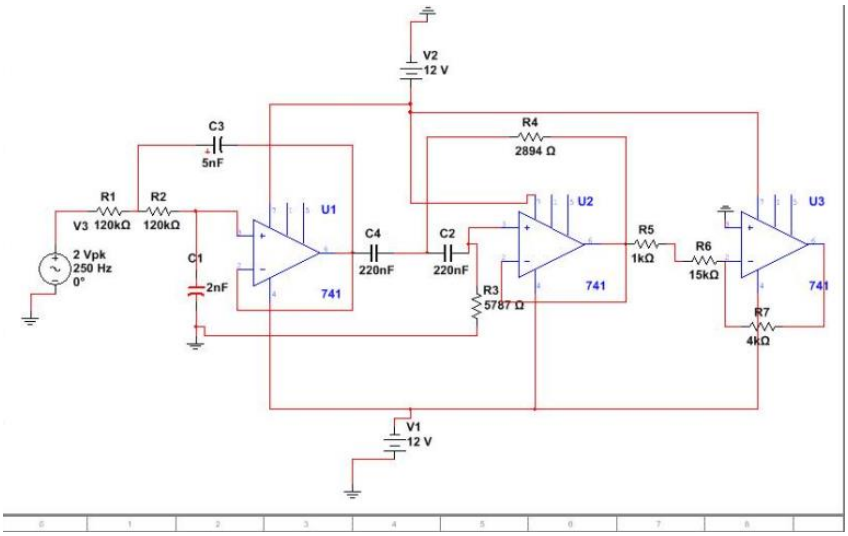



Fig. 10. Análisis de la respuesta del filtro pasa-bajo en corriente alterna

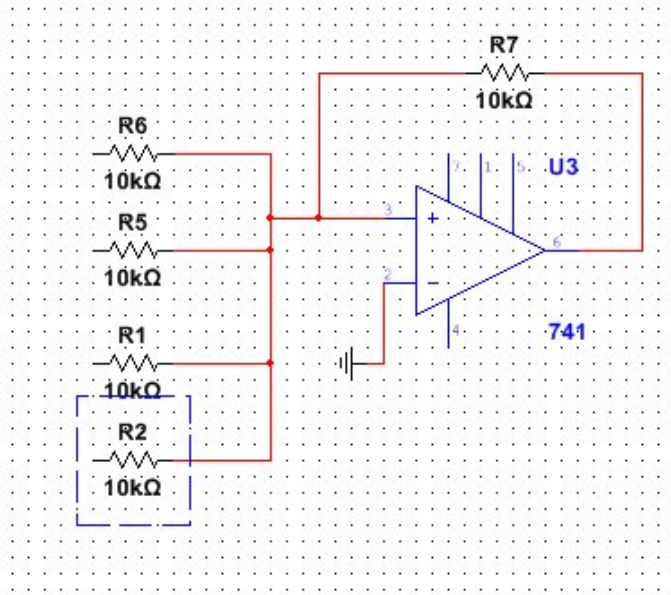



Fig. 11. Simulación etapa de suma

**MONTAJE Y PRUEBA FINAL**

Una vez verificamos que todos los filtros funcionaran correctamente en la simulación, se procede a la etapa de montaje y de prueba. Los resultados de la prueba con el osciloscopio se muestran en la Fig.12 y Fig.13.



Fig.12. Resultado de la prueba del circuito, atenuación de la banda de octava



Fig.13. Resultado de la prueba del circuito amplificación de la banda de octava

**Conclusiones**

[1] Como se puede observar, a lo largo de la investigación, se determinó que el ecualizador gráfico es de gran importancia en el mundo del audio, debido a su fama y su uso en equipos de sonido caseros hasta grabaciones profesionales tanto en el campo musical como en el audiovisual.

[2] A través de la investigación, se puede observar de forma clara que el ecualizador procesa frecuencias para alterarlas con ciertos controles de parámetros de sonido, tanto la frecuencia como la atenuación y el ancho de banda, determinando una frecuencia central para cada banda, y un rango de frecuencias.

[3] En la práctica, el ecualizador gráfico logra ser muy efectivo al seleccionar y trabajar un rango de frecuencias donde se necesita hacer algún ajuste de sonido específico, en este caso, el ecualizador de ocho bandas resulta ser mu exacto en las bandas que se pueden modificar, en este caso, bandas de 30 Hz, Hz 60 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 1 KHz, 2KHz y 4KHz.

[4] Para concluir, se observa que el ecualizador gráfico es una ayuda bastante grande en el campo del audio, tanto musical como audiovisual, ya que éste tipo de dispositivos nos permiten modificar aumentando o reduciendo con gran exactitud la intensidad de una señal sobre la misma frecuencia.

**Bibliografía**

Juan Manuel Millán Esteller. Instalaciones de megafonía y sonorización. Editorial Paraninfo, 2012. Pág. 121-130.

Bob McCarthy, Sound Systems: Design and Optimization Modern techniques and tools for sound system design and alignment 2007. 486 páginas.

Savant, C., Roden, M., Carpenter, G. 1992 Diseño Electrónico Circuitos y sistemas. Adisson-Wesley.

Amplificadores operacionales y circuitos integrals lineales.Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll Pearson Educación, 1999.

Filtros Activos, Conceptos Básicos y Diseño J.I.Huircán.

Síntesis de redes impedancias y filtros. Gustavo Camps Valls, José Espí López, José Rafael Magdalena Benedito Delta Publicaciones, 2008.

Prácticas de la electrónica Paul B. Zbar, Albert Paul Malvino, Michael A. Miller Marcombo, 2001.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSDUCTOR (SUBKICK) PARA REALZAR FRECUENCIAS BAJAS DE UN BOMBO DE BATERÍA

PACS: 43.38.-P

Romo, William; Herrera Martínez, Marcelo
Universidad de San Buenaventura
Carrera 8 H n.° 172-20 | PBX: (57) 1- 667 1090
Bogotá, Colombia
mherrera@usbbog.edu.co

**Resumen**
Un sistema de transducción electroacústica para convertir ondas sonoras, propagándose de un tambor musical a una señal eléctrica es proveído. El sistema incluye una cápsula, un transductor electroacústico, y una cubierta. El dispositivo recibe y convierte las ondas sonoras en la cavidad en una señal eléctrica. Una manera de realzar las frecuencias bajas de una fuente percutiva, es implementar, en la cadena mecano-acústica, un dispositivo denominado Subkick. Este trabajo describe todo el proceso de análisis de transductores en baja frecuencia, es decir radiadores con membranas grandes, hasta el análisis de parámetros relevantes para la adecuación de un sistema Subkick.

## Introducción

Un micrófono dinámico es un instrumento que tiene un transductor con un diafragma para convertir energía mecánica de ondas sonoras en señales eléctricas. Muchos micrófonos son específicamente diseñados para capturar un sonido de un instrumento musical dentro de un rango frecuencial particular. Por ejemplo, algunos micrófonos están específicamente diseñados para capturar un sonido de baja-frecuencia de un tambor, como por ejemplo un tambor-de-bajos, un redoblante, un tambor Tom, un tambor de bongo, etc. Más aún, varios esfuerzos han sido realizados para mejorar la calidad sonora de los micrófonos. Sin embargo, diversos micrófonos producen una señal eléctrica que distorsiona o reproduce de manera inadecuada el sonido de baja-frecuencia que un tambor genera.
El sistema de transducción electroacústica propuesto en el presente trabajo incluye una cápsula, un transductor electroacústico, y una cubierta que tiene una superficie plana. La cápsula está compuesta de una cavidad que consta de una superficie interna y una superficie externa. La superficie externa deflecta las ondas sonoras no-deseadas. El transductor electroacústico recibe las ondas sonoras que se propagan desde el tambor, a través de la boca, y dentro de la cavidad. Además, el transductor convierte las ondas sonoras de la cavidad en señales eléctricas para transmitirlas a un dispositivo periférico.

## ANTECEDENTES

Basado en las experiencias de ingenieros que por accidente utilizaron un altavoz como sistema de transducción aplicado en la captura de frecuencias bajas en el bombo, utilizando un altavoz de la serie conocida N10 de Yamaha, esta compañía optó por el diseño de un producto dedicado exclusivamente para esta función. Nace el famoso Subkick SKRM-100 (Yamaha), que consta de un altavoz Yamaha montado sobre una estructura de un tambor de batería (Tom), utilizando un sistema básico de conexión sencilla directa, sin utilizar filtrados de señal.

El dispositivo de Subkick entonces, logra capturar y posteriormente emitir una región del espectro que con otros dispositivos convencionales (micrófonos destinados al bombo de batería, no sería viable). El dispositivo resultante no deja de ser en esencia un micrófono, en este caso especializado para las frecuencias bajas.

## MARCO CONCEPTUAL ACERCA DE LA CAPTURA DE FRECUENCIAS BAJAS PARA BOMBOS

Para la captura de frecuencias bajas para bombos se utiliza la técnica convencional, es decir colocando un micrófono dinámico PZW dentro del bombo, y otro, también de naturaleza dinámica afuera de éste, como por ejemplo el Beta52A. Sin embargo, para poder capturar de una manera más limpia los tonos graves del bombo, diversos dispositivos han sido implementados. El Subkick parece un tambor, pero no lo es. Parece un altoparlante, pero no lo es. Es un altoparlante funcionando como un micrófono en reversa. El primero de estos dispositivos, como ya ha sido mencionado, fue desarrollado por la compañía Yamaha (ver foto de la figura 1).




Figura 1. Subkick SKRM-100 de Yamaha (Yamaha)

El marco conceptual de transducción electroacústica, puede ser encontrado en el capítulo 3, de Pueo y Ortega (Pueo & Ortega, 2003).

### Transductores dinámicos

Principio del transductor: El transductor dinámico es, en el campo de aplicaciones, el más común. En el caso del altavoz dinámico, los creadores de éste fueron Rice y Kellog (Pueo & Ortega, 2003). El principio del transductor se puede observar en la figura No. 3, en donde

está el conductor de longitud elemental, el cual se encuentra dentro de un campo magnético homogéneo. En el conductor, corre una corriente i, y una fuerza se ejerce,

$$dF = idlxB \tag{1}$$

Y si el conductor se mueve dentro de un campo magnético, con una velocidad v, dentro del conductor existe equilibrio entre la intensidad del campo eléctrico E, debido al movimiento del conductor (en el sentido del polo negativo hacia el positivo), y la intensidad del campo E, debido a la acumulación de cargas al final del conductor,

$$E = vXB \tag{2}$$

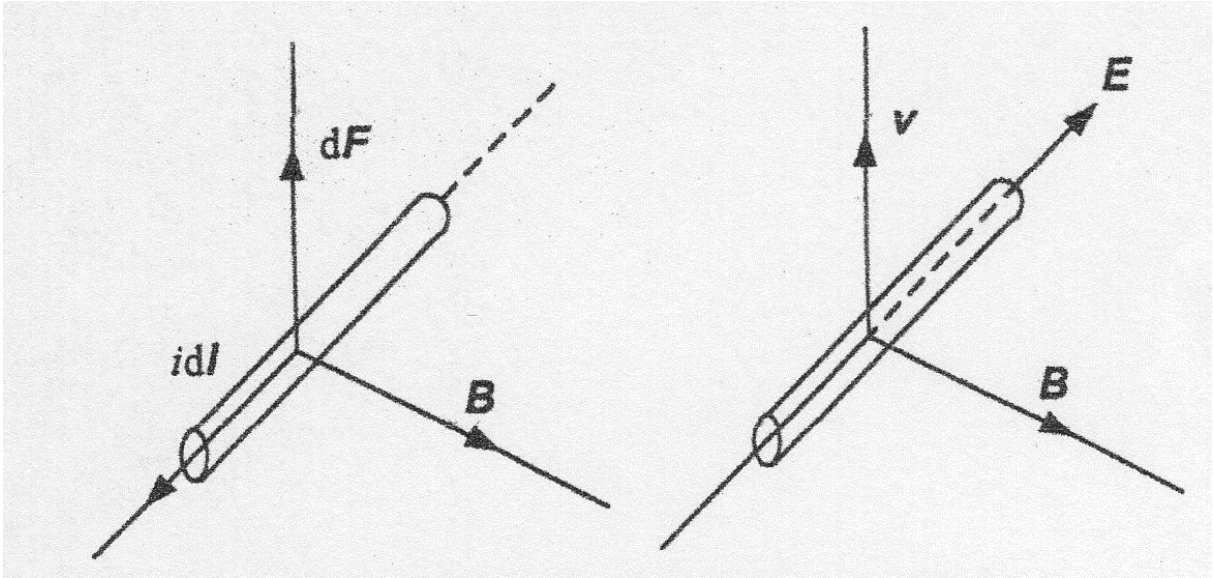



Figura 2. Principio del transductor dinámico (Skvor, 2009)

En este transductor, el campo magnético es homogéneo y el vector del campo magnético es perpendicular al vector dl. La fuerza que se ejerce en el conductor de longitud l es igual a,

$$F = \int_0^l iBdl = iBl \tag{3}$$

Y para el voltaje electromotor,

$$e = \int_0^l (vxB)dl = vBl \tag{4}$$

Esta conversión puede describirse con la ecuación del cuadripolo,

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Bl & 0 \\ 0 & Bl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \tag{5}$$

La constante Bl se denomina coeficiente de transducción dinámica.

$$k_a = Bl(Wb.m^{-1}; T, m) \quad (6)$$

*Descripción del transductor:*

El transductor está compuesto de una bobina, la cual se encuentra dentro de una cavidad de aire de un imán permanente. La bobina está ligada a una membrana, donde el movimiento de la bobina se transfiere, o durante el régimen contrario del transductor, las vibraciones de la membrana son transferidas en la bobina.

En la capa de aire, en donde el campo magnético actúa en dirección radial, está localizada la bobina en conjunto con la membrana. El corte detallado de la bobina con la dirección de la corriente, la dirección y el sentido de la inducción magnética y la fuerza resultante, pueden observarse en la figura 4.

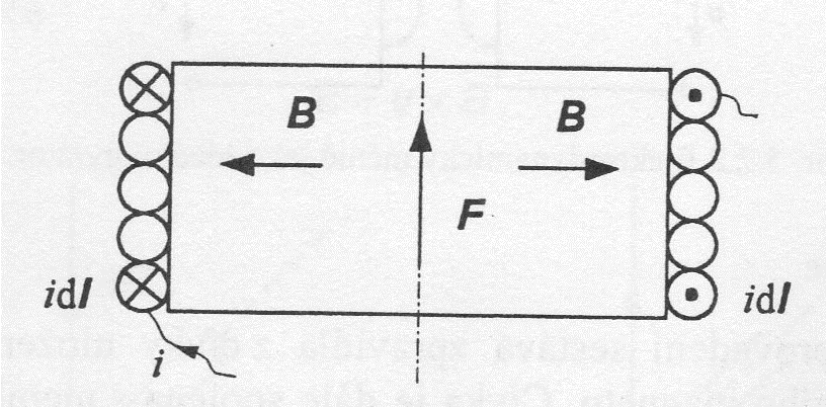



Figura 3. Detalle de la bobina, atravesada por una corriente i, inmersa dentro de un campo magnético B, con la descripción de la dirección y el sentido de la fuerza (Skvor, 2009)

En la realidad, es necesario contar con la influencia de la impedancia eléctrica (la resistencia y la inductancia de la bobina), y en la parte mecánica, la reactancia de la masa de la bobina y de la membrana, la reactancia de la compliancia de la membrana, además de la impedancia de las partes acústicas, etc.

Esto puede observarse en el esquema 5, donde $\mathrm{Z_e}$ es la impedancia eléctrica de la bobina- $\mathrm{Z_m}$, la impedancia mecánica. En los puntos de entrada a-b, está conectado el voltaje e´, y en los puntos de salida c-d, se "ejerce" una fuerza F´, la cual depende, entre otros, en la carga en la salida. Este transductor es recíproco, lo cual posibilita, la conversión en sentido inverso. De esta manera los puntos c-d serán la entrada, y la salida a-b.

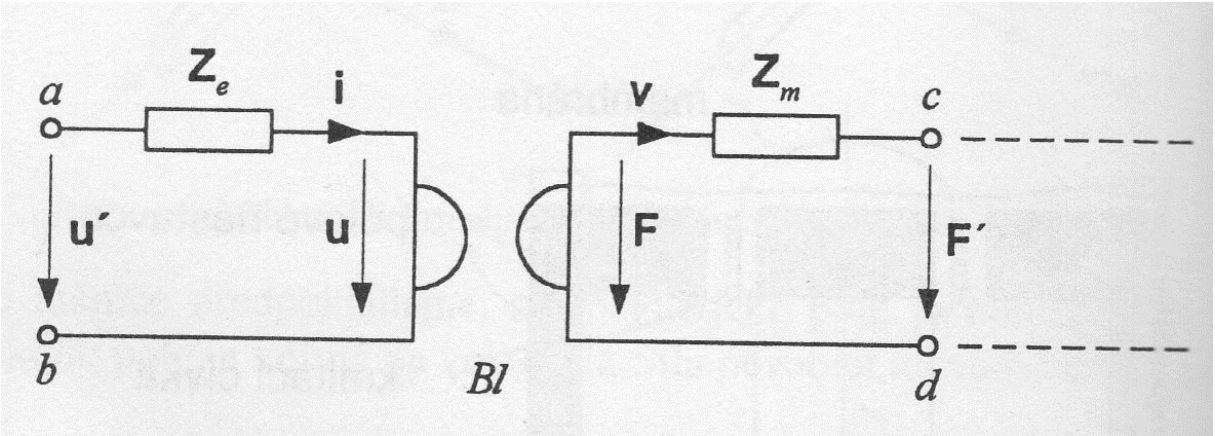



Figura 4. Analogía en impedancia del transductor dinámico (Skvor, 2009)

Para trabajar con los esquemas equivalentes es adecuado utilizar las propiedades del girador y pasar los elementos de la parte mecánica a la parte eléctrica y al contrario.
Para esta transformación es válido que,

$$e = k_a v \tag{12}$$

$$i = \frac{F}{k_a} \tag{13}$$

Y de esta manera, si, $\frac{e}{i} = Z_{0e} = Y_{0e}^{-1}$, y $\frac{v}{F} = Y_{0m} = Z_{0m}^{-1}$

$$Z_{0m} Z_{0e} = k_a^2 \tag{14}$$

El elemento de impedancia mecánica con admitancia $\mathrm{Y_m}$ es posible de convertir en el lado eléctrico, como un elemento con impedancia eléctrica $(\mathrm{Z_m})_\mathrm{e}$, y lo mismo para el elemento eléctrico, con admitancia eléctrica $\mathrm{Y_e}$ es posible de convertir en un elemento con impedancia mecánica $(\mathrm{Z_e})_\mathrm{m}$. De la ecuación () se observa, que el girador ideal transforma sin pérdida de energía de un lado a otro,

$$ei = Fv \tag{15}$$

Con base en la teoría de analogías, los circuitos correspondientes después de la transformación respectiva de un lado a otro del girador, son duales.

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICO-MECÁNICOS DEL PARLANTE PARA EL SUBKICK

La medición de los parámetros acústicos y mecánicos del parlante empleado, se realizó para caracterizar su curva de impedancia, y de esta manera su frecuencia de resonancia.
El circuito implementado para la respectiva medición se muestra en la figura 6:

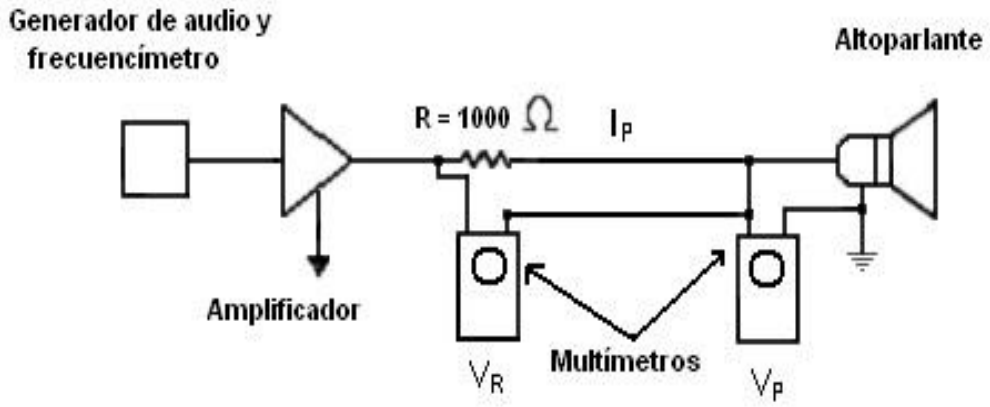



Figura 6. Circuito de medición para la obtención de la curva de impedancia del parlante (Ruffa)

La gráfica de la curva de impedancia obtenida se muestra en la figura 7. De los valores obtenidos se observa que la frecuencia de resonancia del sistema se encuentra en 60 Hz.
Debido a esto, se diseñó e implementó dentro del circuito final, un filtro paso-bajo de segundo orden, con sus elementos calculados a esta frecuencia. La frecuencia de corte de este filtro es de 100 Hz.

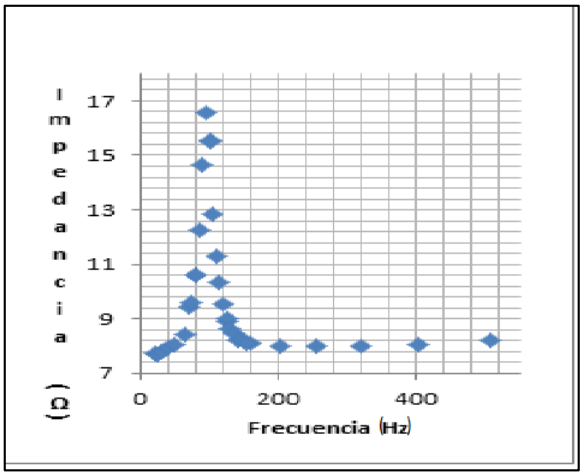



Figura 7. Curva de impedancia del altoparlante utilizado para la construcción del Subkick

## DISEÑO DEL FILTRO PASA-BAJOS PARA EL SUBKICK

Se procede al cálculo de los parámetros de un filtro paso-bajo, debido a que se desea asegurar que sólo los componentes de frecuencias bajas sean capturados y registrados. Para esto, se ha diseñado el filtro que aparece en la figura 8, donde tenemos:
Para una frecuencia de resonancia de 100 Hz,

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f(0.01\mu F)} = 159.15k\Omega \tag{16}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f(0.1\mu F)} = 15.915k\Omega \tag{17}$$

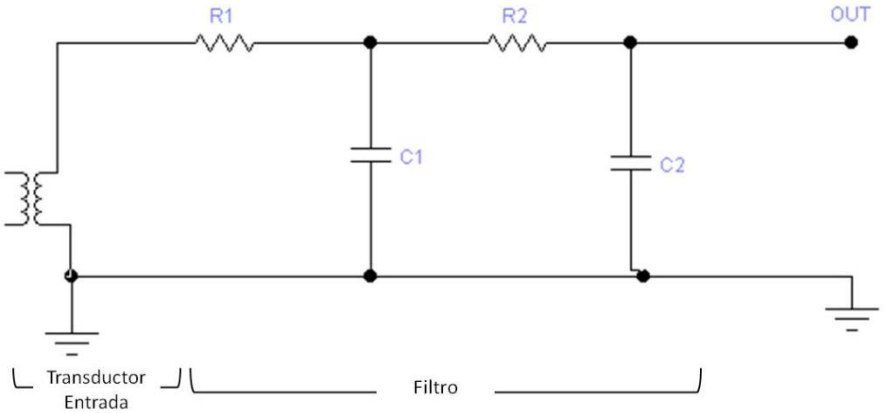



Figura 8. Diseño del filtro paso-bajo para el Subkick

## DISEÑO DE UN SUBKICK PARA EL REALCE DE BAJAS FRECUENCIAS

El sistema completo consta por lo tanto del transductor, del filtro paso-bajo, y del inversor de polaridad. Finalmente el dispositivo cuenta con los pines de salida respectivos para hacer posible el registro de estas señales de baja frecuencia.

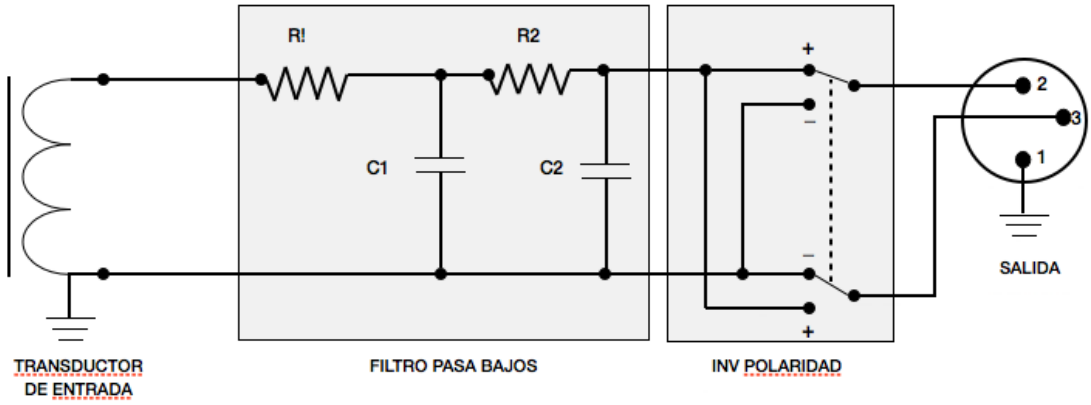



Figura 9. Diseño completo del Subkick

## IMPLEMENTACIÓN DEL SUBKICK PARA EL REALCE DE BAJAS FRECUENCIAS

En la siguiente fotografía tenemos la imagen del Subkick implementado.



Figura 10. Sistema implementado

## CONCLUSIONES

El Subkick es un elemento de captura de frecuencias bajas, que puede enriquecer al sistema de captura tradicional de tambores. Añadiendo un Subkick a la microfonería del kick de la batería, se posibilitará el registro de un mejor sonido de bajas frecuencias (graves). El sonido del kick se enriquece y se incrementa en profundidad y potencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

http://usa.yamaha.com/products/musical-instruments/drums/accessories/lowfreq/skrm-100sfv/

Pueo O.B, & Romá R. M. Electroacústica, Micrófonos y Altavoces, Ed. Pearson, 2003.

Skvor, Z. (2009). Akustika a Elektroakustika. Akademia, Czech Rep.

Beranek, L. Acoustics, American Institute of Physics (1986).

Kinsler, L., Frey R. A., Coppens Alan B. & Sanders J. Fundamentals of Acoustics. Fourth Edition. Jhon Wiley & Sons, Inc. (2000).

Rossing T. D. Springer Handbook of Acoustics. Springer Ed (2007).

Ruffa F. Guía de Laboratorio de Medición de Impedancia del Parlante Dinámico.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO DE ARRAY MICROFÓNICO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS PARA LOCALIZACIÓN DE FUENTES ACÚSTICAS.

**PACs.: 43.60.Jn. 43.28.Hr**

Machín, Jorge; Arana, Guillermo; San Martín, Ricardo; Arana, Miguel
Institución: Universidad Pública de Navarra. Laboratorio de Acústica. Dpto. de Física.
Dirección: Campus de Arrosadia, s/n. 31008.
Población: Pamplona. Navarra.
País: España
Tel: 948 169568
Fax: 948 169565
E-Mail: marana@unavarra.es

## ABSTRACT

In this paper, the first results obtained by the Acoustics Group at the Public University of Navarra in the implementation and development of a microphone array as well as in corresponding software for noise sources localization (beamforming) are presented. Although the small experimental system limits the accuracy of the experimental results in complex situations, the results are very promising. The experimental setup, calibration of the array (level and phase), implemented algorithms and results of the first localization tests are discussed.

## RESUMEN

En esta comunicación se presentan los primeros resultados obtenidos por el grupo de Acústica de la Universidad Pública de Navarra en el desarrollo y puesta a punto de un array microfónico y software asociado para localización de fuentes acústicas (beamforming). Aunque el reducido sistema experimental limita la precisión de los resultados en situaciones experimentales complejas, los resultados obtenidos son muy prometedores. Se expone en la presente comunicación la puesta a punto del dispositivo, calibración de nivel y fase del array, algoritmos implementados y los resultados obtenidos en las primeras pruebas de localización de fuentes acústicas.

## INTRODUCCIÓN

Desde los trabajos pioneros en la localización de fuentes acústicas [1] la técnica del beamforming se ha desarrollado muy rápidamente gracias a la disponibilidad de una mayor velocidad (y potencia) en la adquisición de datos así como el rápido desarrollo del hardware y software de computación. Actualmente, la técnica es básica para analizar fuentes móviles: aviones, trenes, helicópteros, aerogeneradores,..). El desarrollo histórico de la técnica puede verse en las referencias [2].

Dentro de la técnica de beamforming existen múltiples algoritmos [3], [4]. A continuación describimos brevemente dos de los más conocidos.

**DAS (Delay And Sum)**

La localización de fuentes de ruido mediante el método retardo y suma (Delay And Sum, DAS) es, conceptualmente, muy sencilla (Fig. 1). Todos los micrófonos registran a la vez, y se aplica un retardo a cada una de las señales registradas en función del ángulo de incidencia, para posteriormente sumar todas las señales, coincidiendo el ángulo de incidencia con aquel en el que la energía de la señal resultante sea máxima. Debido a que la formación de haz opera en el campo lejano, las ondas sonoras son tratadas como planas. El DAS se aprovecha de este retardo en la propagación de las ondas de sonido entre varios micrófonos para calcular dónde se originó el sonido (localización angular) desde el frente de la matriz de micrófonos.

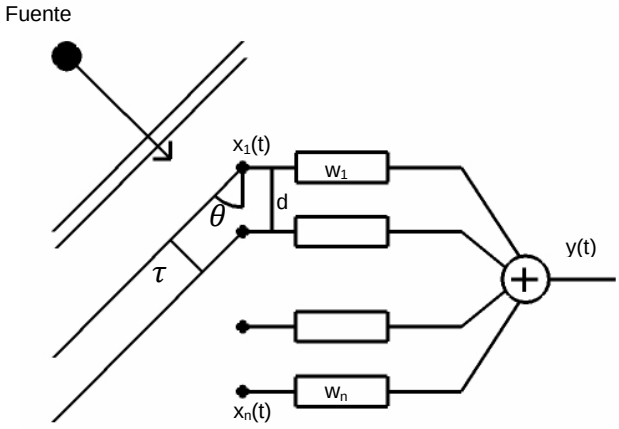



Fig. 1. Esquema del algoritmo DAS.

$$x(t) = [x(t-\tau_1), \dots x(t-\tau_n)\,]^T$$

El retardo temporal entre micrófonos viene dado por:

$$\tau_n = \frac{(n-1)d\ cos\theta}{c}$$

En forma matricial la salida de la localización se representa como:

$$y(t) = W^H\, x(t)$$

**DAS en el dominio frecuencial.**

El algoritmo DAS que trabaja en el domino temporal es simple, aunque su estimación del ángulo de llegada es pobre; además, depende en gran medida del ruido de fondo. Para solucionar todos estos problemas se usa el dominio frecuencial, por lo que los retardos temporales ($\tau_n$) se traducen en desplazamientos en la fase (exponenciales).

El array de señales registradas, en el dominio frecuencial, puede expresarse como:

$$X(\omega) = X(\omega)s(\omega,\theta)$$

Donde $X(\omega)$ es la transformada de Fourier de x(t) y $s(\omega)$ es el vector de direcciones (steering vector).

$$s(\omega,\theta) = e^{-jw[\tau_1,\tau_2 \dots \tau_n]}$$

En forma matricial la salida de la localización, en banda estrecha, puede representarse como:

$$Y(\omega) = s(\omega)^H\, X(\omega)$$

Este algoritmo, al igual que en el DAS en el dominio temporal busca aquel (o aquellos) ángulos en los que la energía de la señal resultante sea máxima.

Además de los algoritmos antes mencionados, hemos implementado otros algoritmos como el MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) [5] y el MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) [6]. Un buen resumen de otros algoritmos puede verse en la bibliografía [7].

## IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

### Dispositivo experimental:

Se trata de una primera aproximación al problema, con un reducido sistema experimental el cual limita la precisión de los resultados en situaciones experimentales complejas, aunque los resultados obtenidos han sido prometedores en situaciones controladas.

Dicho sistema experimental consta únicamente de 8 micrófonos G.R.A.S tipo A40. Para el registro de las señales de presión se utilizó el software LabView con un módulo de adquisición COMPACTDAQ de National Instruments.

### Calibración

Con el objetivo de analizar el dispositivo de medida, tanto en nivel como en fase, se realizó una verificación de los distintos canales del equipo, con el fin de conocer la sensibilidad de cada uno de los micrófonos y el posible desfase entre ellos. En esta prueba se utilizó un calibrador B&K tipo 4230, con el que se obtuvo las sensibilidades de cada uno de los micrófonos mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Sensibilidad de los micrófonos.

| **Mic. nº** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **S(mV/Pa)** | 12,16 | 13,00 | 13,58 | 11,00 | 13,51 | 11,74 | 13,12 | 13,26 |

Tal y como se observa en la Tabla 1, cada uno de los micrófonos tiene una sensibilidad distinta, por lo que deberemos ser minuciosos con el orden y el etiquetado de esta instrumentación.

Como es conocido, los micrófonos de presión pueden responder de distinta manera bien con fase positiva, bien con negativa, ante la llegada de un frente de onda (sobrepresión). Para el cálculo de niveles sonoros y análisis espectral de la señal, no es una cuestión de mayor importancia que sea una u otra. Sin embargo, en el caso de localización de ruidos es importante que no existan desfases entre los diferentes micrófonos.

Al no disponer de sistema de calibración de fase para los micrófonos, se realizaron pruebas controladas con señales pseudoimpulsivas (petardos), fuentes que han mostrado buenos resultados en múltiples aplicaciones [8]. Se eligió este tipo de fuente debido a que son bastante omnidireccionales o, equivalentemente, muy poco directivas. Para ello, se hicieron explotar varios petardos y se registraron las señales en diferentes posiciones y configuraciones del array microfónico. Todas las pruebas se llevaron a cabo en condiciones de campo abierto (en una zona ajardinada).

La impulsividad de las señales utilizadas permite separar muy bien el sonido directo y posteriores reflexiones. Además, la absorción del suelo (también separable en los registros) es bastante alta. El array microfónico estaba colocado sobre una plataforma, de madera de 1,2 metros de diámetro, apoyada en el suelo. Se utilizó este dispositivo de acuerdo con la norma IEC 61400-11 [9].

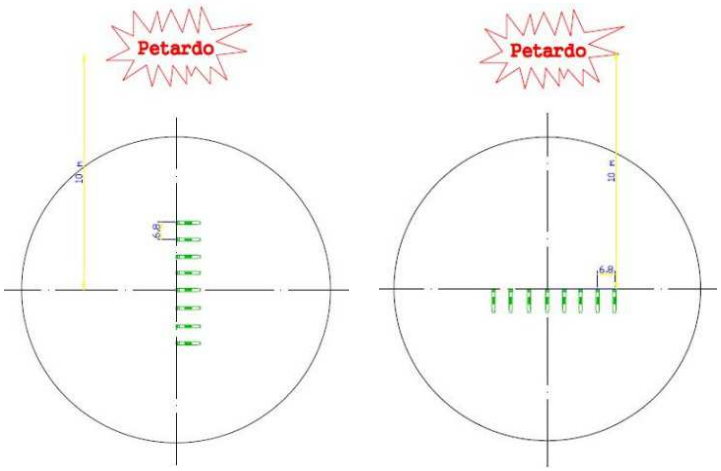



Fig.2. Distancia desde la fuente al array micrófonico y disposición de éste (distancia entre micrófonos: 6,8 cm)

Para la primera disposición del array (Fig. 2 izq.) se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (10,48 m, aproximadamente, del más alejado) mientras se registraba la señal. Análogamente, se hicieron explotar dos petardos a una distancia de 10 m del micrófono más próximo (el central) para la segunda disposición del array (Fig. 2. dcha).

Dado el gran número de datos, se programó un libro en Excel para automatizar la búsqueda de la señal impulsiva, la selección de muestras a representar, la representación gráfica (tanto en voltaje como en NPS, teniendo en cuenta la corrección por la calibración individual de cada micrófono), la diferencia en número de muestras entre máximos, etc.

La Fig. 3. muestra en nivel sonoro en dB (ref. 20 μPa) tras corregir los voltajes medidos por la sensibilidad de cada micrófono obtenida anteriormente. Como se observa, los niveles son prácticamente iguales para los ocho canales, las diferencias son inferiores a 0,2 dB en cada uno de los casos.

Lo importante, para el objetivo de este apartado, es el desfase entre los micrófonos. La disposición experimental (separación de 68 mm entre los micrófonos) implicaba una separación, en muestras, de $\frac{6{,}8\cdot 10^{-2}(m)\cdot 100.000(muestras\cdot s^{-1})}{340(m\cdot s^{-1})}=20(muestras)$

Como muestra la Fig. 3, la separación entre máximos es de, exactamente, 20 muestras. Si bien los resultados mostrados no constituyen una calibración standard de la fase (para cada frecuencia) entre los 8 micrófonos, los resultados encontrados en estas medidas bien controladas indican que los micrófonos no difieren en más de 3,6º (para una frecuencia de 1KHz), en su fase:

$$\frac{2\pi(rad)\cdot 1000(s^{-1})}{100.000(muestras\cdot s^{-1})}=\frac{\pi}{50}(rad)=3{,}6^{o}$$

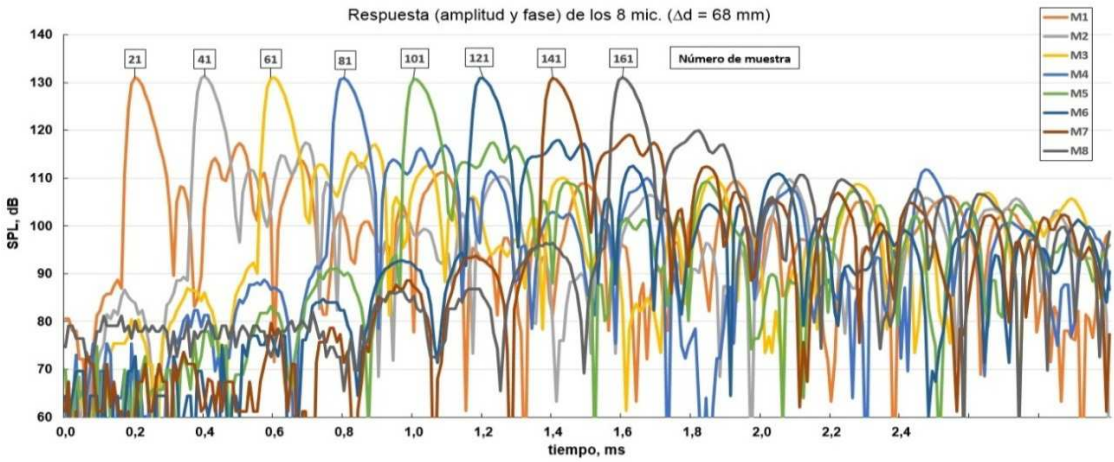



Fig. 3. Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la primera configuración del array de micrófonos.

Para la segunda disposición (ver Fig 2. dcha), con el array perpendicular a la línea que une el centro del array con la fuente pseudoimpulsiva, se obtuvieron los niveles de presión sonora mostrados en la figura 4. En este caso, la diferencia de caminos entre la fuente y el micrófono más alejado y entre la fuente y el micrófono más próximo, es de 2,832 mm, por lo que no cabía esperar separación, ni siquiera de una muestra, entre los máximos de la señal, como así se observa en la gráfica. Por otra parte, la apertura angular del array, desde la fuente es 1,37º, por lo que tampoco cabía esperar diferencias de nivel, hecho que también se cumple. Cumpliendo una de las premisas básicas del beamforming, que la fuente se sitúe lo suficientemente lejos para que las ondas se puedan considerar planas.

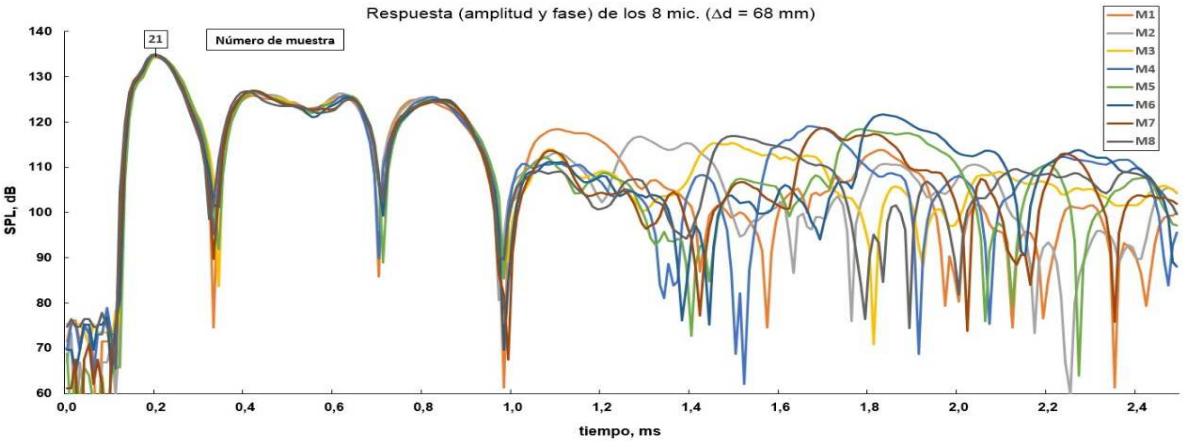



Fig.4. Registros temporales (NPS) para el primer petardo en la segunda configuración del array de micrófonos.

**RESULTADOS**

Tras la calibración del sistema de medida, se realizaron algunas medidas con distintas configuraciones tanto de disposición del array como de las fuentes emisoras. A su vez, también se realizaron varias simulaciones con las mismas configuraciones de las medidas.

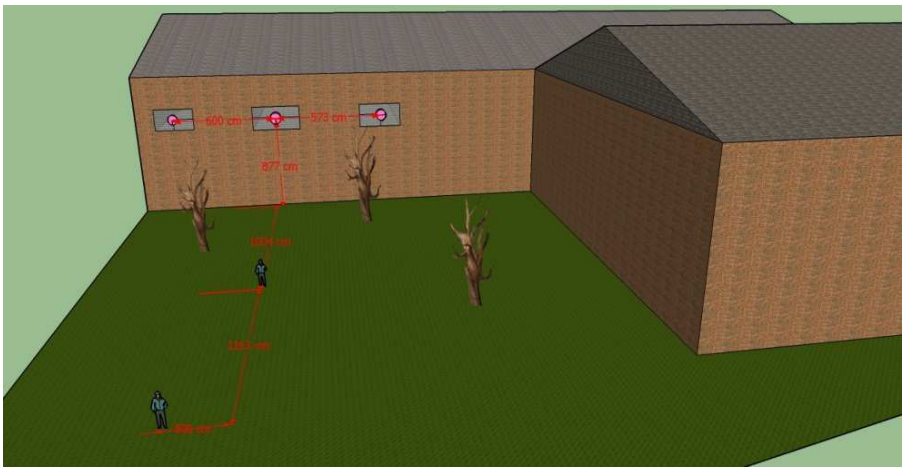


Fig.5. Representación espacial de las fuentes/altavoces (en rosa) y los arrays (personas) con sus distancias.

En la tabla 2 podemos observar el resultado de las simulaciones y de las mediciones para distintos algoritmos de localización. Concretamente se trata de una configuración en el que las fuentes 1, 2 y 3 están emitiendo señales sinusoidales de 1, 2 y 3 KHz respectivamente. El Array microfónico se situó en la posición de medida 2 (la más alejada de la pared). El array utilizado se muestra en la figura 6.

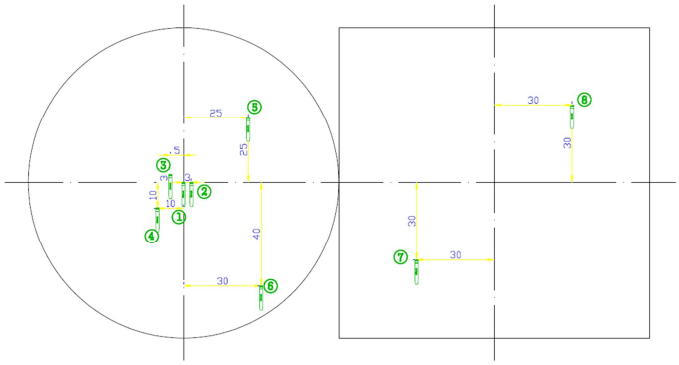


Fig.6. Disposición del array durante las mediciones.

Tabla 2. Comparación de ángulos en los diferentes métodos de localización sobre la medida real y simulada.

| | | | SIMULACIÓN | | MEDIDA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fuente | Ángulo | Geometría | DAS TIEMPO | DAS FREC | DAS TIEMPO | DAS FREC |
| 1 | Azimutal | 87,4 | 86,8 | 87,0 | 84,0 | 81,0 |
| | Elevación | 22,0 | 30,0 | 24,0 | 12,0 | 21,0 |
| 2 | Azimutal | 103,0 | 99,0 | 102,0 | 105,0 | 99,0 |
| | Elevación | 21,5 | 15,0 | 24,0 | 6,0 | 21,0 |
| 3 | Azimutal | 116,3 | - | 114,0 | - | - |
| | Elevación | 19, 9 | - | 18,0 | - | - |

En la tabla 2 no hay resultados en la banda de 3KHz, salvo en la simulación con el algoritmo DAS en frecuencia, debido a que hay varios lóbulos cercanos y no hay razones objetivas para

decidir cuál de ellos es el que proviene de la fuente, pues no son máximos absolutos. Probablemente se deba a la configuración del array de medida, la distancia entre receptores es demasiado grande para esta frecuencia. Sin embargo, sí que hay resultados en los demás casos del algoritmo DAS en frecuencia y son bastante similares a los que indica la geometría. Teniendo en cuenta que los algoritmos programados tienen una resolución de 3º tanto en azimutal como en elevación, esto es debido a un compromiso entre tiempo de cálculo y precisión en la medida.

Por otro lado, el algoritmo DAS en tiempo localiza bien los ángulos azimutales, mientras que falla a la hora de localizar el ángulo de elevación.

**Fuente en movimiento**

Otro problema que suele verse relacionado con la localización de ruido es que las fuentes de ruido no son fijas, por ello tras la configuración del array se pasó a realizar una prueba con fuentes móviles, para ello se utilizó una caja acústica sobre un carro con ruedas. Se situó el array a una distancia de 10 m del altavoz, moviéndose este en la perpendicular que une la matriz de micrófonos y el altavoz con un recorrido de ± 6 metros.

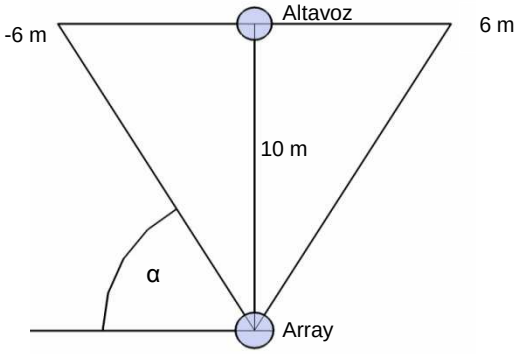
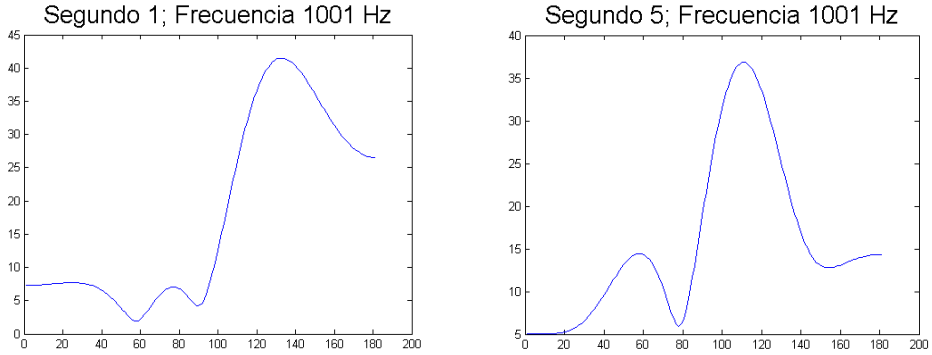



Fig. 7. Esquema del estudio de localización de la fuente en movimiento.

Para realizar la localización, al haber desplazamiento de la fuente de ruido, no se pueden aplicar los algoritmos al total de la señal, sino que se debe dividir la señal en pequeños bloques temporales, y aplicar los algoritmos de localización a cada uno de ellos dando como resultado la evolución de la ubicación de la fuente con el tiempo.

En la figura 8, se muestra la evolución temporal del ángulo de llegada del ruido, para los instantes 1, 5, 10 y 15 segundos. Se puede observar como la fuente de ruido, en este caso 1 KHz, se desplaza desde la posición +6 metros (140º) hasta la posición -6 metros (60º). La duración del trayecto es, aproximadamente, de unos 15 segundos y la duración temporal del bloque escogido para la localización es de 0.1 segundos, lo que supone 0,8º del movimiento de la fuente.



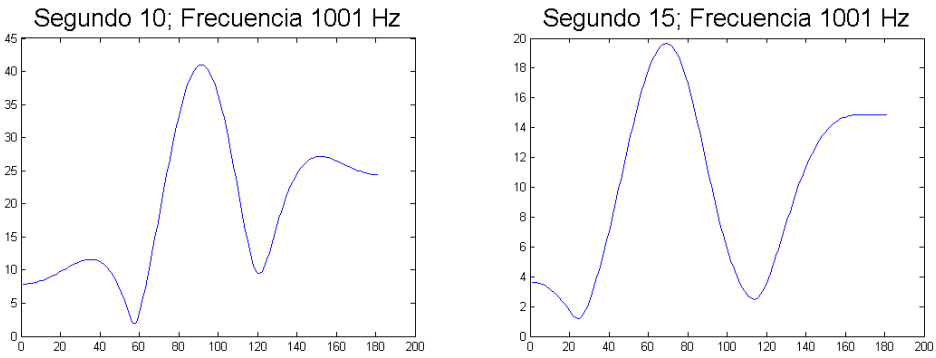



Fig. 8. Ángulo que indica la dirección de la fuente en distintos instantes de tiempo de la grabación (1, 5, 10 y 15 segundos). Eje x representa el ángulo de llegada en grados. Eje y unidades arbitrarias.

## CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo ha servido para introducir al Laboratorio de Acústica de la Universidad Pública de Navarra en el campo de la localización de fuentes de ruido, diseño de arrays, calibración de sistemas de adquisición de datos, etc. Se puede concluir en que con el poco equipo disponible se pueden localizar ruidos en situaciones contraladas (campo libre, tonos puros, etc.). No obstante, ante situaciones más complejas, como puede ser la localización de ruido en un molino eólico, se ha visto como el array disponible es claramente insuficiente. A su vez se han planteado varias líneas futuras, como pude ser la implementación de más algoritmos de localización de ruido, de hecho en la actualidad ya se dispone de algún algoritmo más programado (MVDR, MUSIC). La principal línea futura, en la que ya estamos trabajando, es en la creación de micrófonos de bajo coste, con el objetivo de incrementar el tamaño del array a un precio razonable.

## REFERENCIAS

[1] J. Billingsley, R. Kinns, “The acoustic telescope,” Journal of Sound and Vibration, 48, (1976), pp. 485-510

[2] Ulf Michel, History of Acoustic Beamforming, Berlin Beamforming Conference (BeBeC), Nov. 2006. Berlin.

[3] B&K, Technical Review (Beamforming) No.1_2004

[4] Mingsian R. Bai, Jeong-Guon, Ih, Jacob Benesty, Acoustics Array System, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2003. ISBN 978-0-470-82723-9

[5] R. G. Lorenz and S. P. Boyd, “Robust minimum variance beamforming,” IEEE Trans. Signal Processing, vol. 53, May 2005.

[6] G. Bienvenu and L. Kopp., “Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach”, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol.ASSP-31, pp. 1234-1248, October 1983.

[7] V. Krishnaveni, T. Kesavamurthy and Aparna. B, Beamforming for Direction-of-Arrival (DOA) Estimation-A Survey. International Journal of Computer Applications, 61 (11), January 2013

[8] Miguel Arana, Antonio Vela, Luisa San Martin, Calculating the impulse response in rooms using pseudo-impulsive acoustic sources, ACUSTICA - Acta Acustica, 89 (2003) pp.377-380.

[9] IEC 61400-11, Wind turbines- Part 11: Acoustic noise measurements techniques, 2012, Geneva, Switzerland.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ONVIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ARRAY DE MICRÓFONOS MODULAR DE PROPÓSITO GENERAL PARA LA CAPTURA Y PROCESADO DE AUDIO ESPACIAL

PACS: 43.38.-p

Jesus Lopez-Ballester[1], Maximo Cobos[1], Juan J. Perez-Solano[1],
Gabriel Moreno[1], Jaume Segura[1]
[1] SPAT – Departamento de Informática, Universitat de Valencia, Avd. de la Universitat s/n, 46100 Burjassot, España
E-mail: Jesus.Lopez-Ballester@uv.es

## ABSTRACT

Sound acquisition for spatial audio applications usually requires the use of microphone arrays. Surround recording and advanced reproduction techniques such as Ambisonics or Wave-Field Synthesis usually require the use of multi-capsule microphones. In this context, a proper sound acquisition system is necessary for achieving the desired effect. Besides spatial audio reproduction, other applications such as source localization, speech enhancement or acoustic monitoring using distributed microphone arrays are becoming increasingly important. In this paper, we present the design of a general-purpose modular microphone array to be used in the above application contexts. The presented system allows performing multi-channel recordings using multiple capsules arranged in different 2D and 3D geometries.

## RESUMEN

La adquisición de sonido para su uso en aplicaciones de audio espacial requiere generalmente del uso de arrays de micrófonos. La grabación de sonido envolvente y el uso de técnicas avanzadas de reproducción como Ambisonics o Wave-Field Synthesis también requieren el uso de micrófonos multi-cápsula. En estos contextos, un sistema de adquisición de sonido adecuado es esencial para obtener el efecto deseado. Además de la grabación y reproducción espacial de audio, otras aplicaciones que requieren el uso de arrays de micrófonos distribuidos, como la localización de fuentes sonoras, la mejora de grabación de voz o la monitorización acústica de entornos, se están haciendo cada vez más importantes. En este artículo presentamos el diseño de un micrófono modular (multi-cápsula) de propósito general, para ser usado en las aplicaciones descritas anteriormente. El sistema que presentamos permite realizar grabaciones multicanal utilizando diferentes cápsulas dispuestas en varias geometrías 2D y 3D.

## 1. INTRODUCCIÓN

La elevada capacidad de procesado de los equipos informáticos actuales permite, comparado con equipos de hace pocos años, trabajar con una gran cantidad de información que proporcionan diferentes tipos de sensores. En el campo del procesado de audio, esta mejora en la capacidad de proceso ha permitido la aparición de numerosas aplicaciones y técnicas capaces de trabajar con varios canales simultáneamente, más allá del estéreo de 2 canales convencional.

Si bien el uso de sistemas multicanal para la reproducción espacial se ha hecho popular (sistemas 5.1, 7.1, etc. ampliamente disponibles en el mercado) y la oferta de dispositivos es muy extensa, no es menos importante el sistema de adquisición de las señales de audio. Si observamos un sistema de reproducción espacial que contempla las tres dimensiones del espacio, como Ambisonics [1] por ejemplo, y no solo un plano, a la hora de reproducir necesitaremos realizar la adquisición de las señales por al menos 4 micrófonos situados de una manera específica. Otro ejemplo es la reproducción Wave-Field Synthesis, cuyas grabaciones deben ser realizadas también mediante el uso de múltiples micrófonos [2].
Las técnicas de procesado de señal para la detección de eventos acústicos y ubicación de fuentes sonoras [3, 4], son otro ejemplo de aplicaciones que necesitan de la adquisición de audio con múltiples micrófonos dispuestos de manera específica.

Es por lo tanto necesario el disponer de un sistema formado por un conjunto de micrófonos que seamos capaces de configurar en diferentes geometrías. En este campo el mercado ofrece muchas menos soluciones y muy poco versátiles, viéndonos forzados a adquirir un dispositivo distinto para cada aplicación específica y a precios por lo general elevados.

Nuestro objetivo ha sido crear un dispositivo que comprenda hasta 8 micrófonos (por el momento), configurables individualmente y que puedan disponerse en diferentes geometrías (array lineal, array circular, array plano, tetraedro, etc.) dependiendo del uso en cada momento.

Presentamos por lo tanto un micrófono multi-cápsula con un consumo muy bajo, un coste de fabricación reducido y que puede configurarse en diferentes geometrías 3D. Todo ello conforma un único dispositivo de alto rendimiento, bajo coste y consumo reducido.

## 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el caso de los micrófonos comerciales, la cápsula que actúa de transductor del sonido y el preamplificador de la esta se sitúan juntos dentro del mismo micrófono. Como nuestra idea era construir un micrófono multi-cápsula que se pudiera configurar de diferentes maneras, lo primero que hicimos fue separar la cápsula del preamplificador. Esto nos permitiría tener las cápsulas sueltas conectadas por medio de un cable apantallado a los preamplificadores, que podrían estar todos juntos al estar separados de las cápsulas.
Así pues, el desarrollo de nuestro micrófono se ha dividido en 2 pasos. Un primer paso que consiste en diseñar una parte electrónica, compuesta por las cápsulas situadas en el extremo de cables que conducen a un preamplificador de varios canales y un segundo paso que consiste en el diseño de una parte mecánica que permitirá ubicar estas cápsulas de diferentes maneras.

### 2.1 Diseño Electrónico

Para separar las cápsulas de los preamplificadores es necesario contar con unas cápsulas capacitivas que nos den una salida a nivel suficiente para que la señal sortee con seguridad la distancia al preamplificador. Las cápsulas capacitivas electret nos ofrecen la solución a este problema, pues constan de un pre-preamplificador incorporado dentro de la cápsula. Gracias a una pequeña alimentación de corriente continua a través de los 2 propios cables de la señal, nos proporcionaba la señal suficiente para atacar nuestros preamplificadores a distancia. Así

pues las cápsulas elegidas son unas cápsulas electret cilíndricas de 9.5 x 7mm, con una respuesta en frecuencia significativamente plana de 50Hz a 10KHz y que se alimentan con una corriente de 0.8 a 1mA.

Como concebimos muestro micrófono para trabajar con 8 cápsulas, se han diseñado 8 preamplificadores iguales que nos proporcionen un canal de salida por cápsula. Así, la parte electrónica de nuestro micrófono multi-capsula, a parte de las cápsulas que van fuera del circuito, se compone de 8 preamplificadores y una etapa de alimentación común a estos. El diseño de los 8 preamplificadores es idéntico y la base de cada uno es un amplificador operacional integrado de muy bajo ruido, con baja distorsión armónica, alta impedancia de entrada (basado en JFET) y reducido consumo. Se han empleado dos redes de resistencias para equiparar la impedancia que ve cada entrada del amplificador operacional, tanto la inversora como la no inversora.

La cápsula electret se alimenta desde el propio preamplificador y a la entrada de este dispone de un filtro de paso alto que elimina los posibles efectos que pudiera tener cualquier nivel de continua y que atenúa los posibles acoples de rizados en la alimentación, tanto del circuito, como de equipos cercanos, para que no sean amplificados junto con la señal de la cápsula.
A la salida del preamplificador se realiza otro filtrado para que no pase a la salida ningún nivel de continua y para que no se provoquen daños en el preamplificador en el caso de conectar por error un equipo que proporcione alimentación fantasma.

Al estar diseñando los preamplificadores a medida, hemos dispuesto que la señal de salida sea capaz de alimentar no solo una entrada de micrófono, sino una entrada de línea de cualquier equipo comercial, pudiendo proporcionar más de 500mV y 2,5 mA por canal. Para poder variar la ganancia de cada preamplificador, se le ha dotado de un potenciómetro con el que se puede ajustar la misma de 0 a 200 con respecto de la señal de entrada. Este potenciómetro le proporciona al preamplificador menos dependencia con la tolerancia en los valores de los componentes electrónicos. Al poder variar la ganancia de cada uno individualmente, podemos compensar las diferencias calibrando la salida de los 8 al mismo nivel o conseguir efectos deseados situando las ganancias de cada uno a niveles diferentes, según la aplicación.



Figura 1. Preamplificador de 8 canales.

Para simplificar la alimentación del sistema completo, hemos incluido un regulador de tensión. Este, nos proporciona una tensión de 5 voltios regulados y constantes para los preamplificadores y las cápsulas y permite alimentar al sistema completo con cualquier tensión continua en el rango de 5 a 18 voltios sin importar que esté regulada o no. Así evitamos también cualquier posible filtración de ruido de alimentación en los amplificadores. Hemos incluido dos filtros capacitivos a la entrada y salida del regulador para mejorar el comportamiento transitorio del mismo, al conectar o desconectar la alimentación. Para evacuar el calor que podría generar este regulador también se le ha incorporado un radiador de aluminio por si fuera necesario, aunque no parece probable dado que el consumo de los 8 preamplificadores es muy reducido.

Las conexiones entre elementos se realizan empleando conectores jack (6.35mm) para las señales de salida del preamplificador hacia otros equipos y mini-jack (3.5mm) para las conexiones de entrada provenientes de las cápsulas. Para la alimentación se emplea un conector dc-jack de 2.1x5.5mm. Cabe mencionar que cada cápsula y cada conexión están numeradas para facilitar la identificación de las mismas al configurar cualquier software de adquisición.

Midiendo el consumo del circuito completo hemos obtenido un consumo de 37.4mA funcionando en condiciones normales, lo que nos da una idea del bajo consumo del sistema. Esto nos permitiría alimentarlo en un futuro usando una batería o baterías convencionales, lo que nos proporciona mucha más libertad de acción y movilidad.

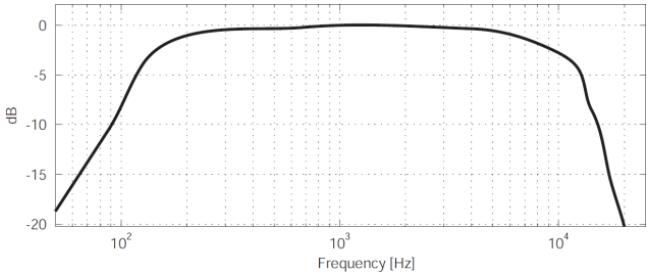



Figura 2. Respuesta en frecuencia del sistema completo.

Se ha medido también la respuesta en frecuencia del sistema completo, procesando señales de distinta frecuencia, arrojando los resultados que se muestran en la Figura 2. Aunque pueda parecer que la respuesta en frecuencia es más estrecha que la obtenida de otros micrófonos comerciales (debido a la respuesta de la cápsula utilizada), esta es suficiente para la mayoría de aplicaciones mencionadas, que no requieren de alta fidelidad. Por otra parte, se debe enfatizar de nuevo que el sistema ha sido diseñado para lograr un coste muy reducido y una máxima versatilidad.

### 2.2 Diseño Físico

Para el diseño físico del sistema de soporte de las cápsulas se ha buscado la mayor versatilidad posible y facilidad de configuración. Para ello hemos creado soportes con diferentes formas donde se pueden insertar fácilmente las cápsulas. El material escogido es el MDF por su facilidad de mecanización. Se han escogido las siguientes 4 formas para los soportes:

- Matriz de 4 x 4 posiciones.
- Array lineal de 8 posiciones.
- Array circular de 8 posiciones.
- Array tetraédrico.

El soporte en forma de matriz de 4 por 4 posiciones que vemos en la Figura 3(a), nos permite situar las cápsulas de diferente manera, dependiendo de la aplicación que le vayamos a dar. La separación de las mismas es de 20mm. Con este soporte podemos crear arrays planos y lineales, útiles en las técnicas de localización [4] y diferenciación de fuentes sonoras, y conformación de haz sonoro, (en adelante “beamforming”) [5] mediante diferentes orientaciones.



(a) Matriz de 4 x 4 posiciones.



(b) Array circular de 8 posiciones.

Figura 3. Estructuras en forma de matriz y array circular.

El soporte que forma un array circular, mostrado en la Figura 3(b), se puede usar para la localización de fuentes sonoras pero debido a su geometría circular, se puede usar también para analizar campos sonoros en términos de armónicos circulares, permitiendo la implementación de técnicas de beamforming modal [6]. Por otro lado, la estructura lineal mostrada en la Figura 4(a), permite usar el micrófono mediante técnicas de procesado de señal consiguiendo diferentes anchuras de haz sonoro.



(a) Estructura lineal.



(b)Estructura tetraédrica.

Figura 4. Estructuras lineal y tetraédrica.

Además de los tres soportes descritos, hemos fabricado un micrófono tetraédrico con las cápsulas fijas en una sola posición, como se puede ver en la Figura 4 (b), debido a la dificultad de inserción de las cápsulas en el ángulo correcto en un dispositivo de tan reducidas dimensiones. Este micrófono de 4 cápsulas se conecta, como el resto de cápsulas al preamplificador y la altura de cada cara del tetraedro formado es de 40mm. . Este micrófono tetraédrico nos permite la grabación de audio espacial o sonido envolvente, Ambisonics [1], emplear técnicas de grabación Wave-Field Synthesis [2], técnicas de localización tridimensional de fuentes sonoras [7] además de otras aplicaciones [8].

Finalmente, en la Figura 5 podemos ver el sistema completo con solo 4 cápsulas conectadas a las entradas del preamplificador y algunos de las estructuras de soporte mencionadas.

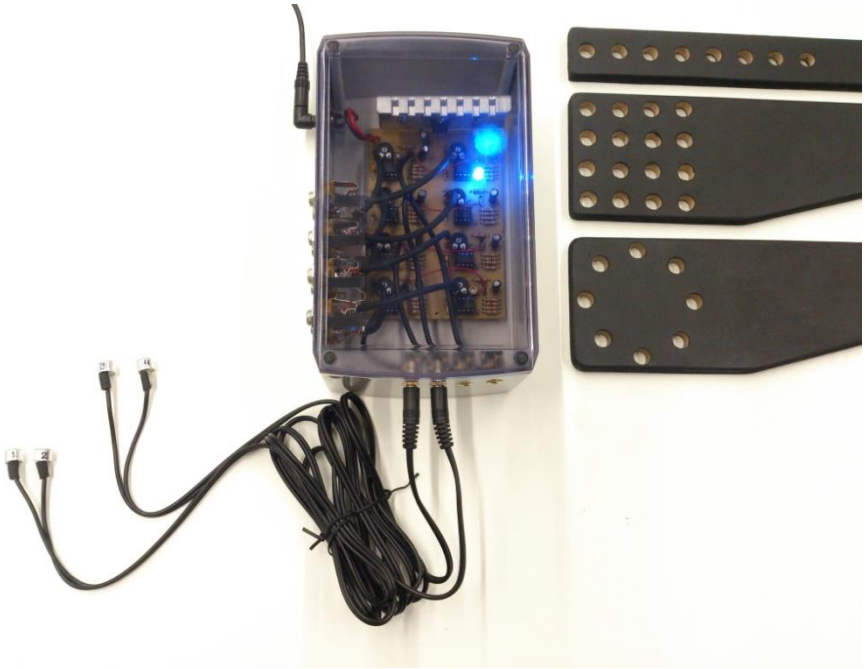


Figura 5. Visión general del sistema completo.

## 3. CONCLUSIONES

Tener la capacidad de poder montar diferentes configuraciones de micrófonos de manera rápida y sencilla es esencial para poder aprovechar la capacidad de procesamiento que nos brindan los equipos informáticos actuales. Esto nos permite desarrollar nuevas aplicaciones mediante la grabación de sonido espacial con un coste muy reducido y emplear técnicas de detección y localización de eventos, implementar técnicas de reducción de ruido, análisis de campo sonoro, etc.

En este artículo hemos el proceso de diseño y la implementación de un micrófono modular multi-cápsula que permite diversas configuraciones espaciales: array lineal, array plano, array circular y array tetraédrico. La salida del sistema puede alimentar una entrada de línea de equipos comerciales habituales, y no necesita unos requisitos de alimentación muy estrictos.
Por otra parte, presenta un reducido consumo, lo que le permitiría funcionar con baterías convencionales y su ancho de banda es más que suficiente dado el carácter de las aplicaciones a las que va destinado.

Las características modulares de este micrófono nos permiten desarrollar nuevas aplicaciones haciendo uso de su diversidad espacial, para la grabación de audio espacial, análisis de campo sonoro, localización de fuentes, beamforming diferencial, etc. Por otra parte, debido al coste económico del sistema y su bajo consumo de energía, es una alternativa muy adecuada para el desarrollo de nuevas redes de sensores acústicos.

## 4. REFERENCIAS

1. **Gerzon, M. A.***Ambisonics in multichannel broadcasting and video.* s.l. : Journal of the Audio Engineering Society, 33(11), 859-871., 1985.

2. **Cobos, M., Spors, S., Ahrens, J. y López, J.J.***On the use of small microphone arrays for wave field synthesis auralization*: Audio Engineering Society Conference: 45th International Conference: Applications of Time-Frequency Processing in Audio., 2012.
3. **Gay, Steven L., Benesty, Jacob (Eds.).** *Acoustic signal processing for telecommunication.* Kluwer Academic., 2000.
4. **Cobos, M., Lopez, J. J., and Martinez, D.***Two-microphone multi-speaker localization based on a Laplacian mixture model.* Universidad Politécnica de Valencia, Institute of Telecommunications and Multimedia Applications (iTEAM), : Digital Signal Processing, 2011. 21(1), 66-76.
5. **Elko, G. W.** Differential micophone arrays. En el libro: Audio signal processing for next-generation multimedia communication systems. USA : Springer US., 2004.
6. **Torres, A. M., Cobos, M., Pueo, B., and Lopez, J.J.***Robust acoustic source localization based on modal beamforming and time frequency processing using circular microphone arrays.*: The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. 132(3), 1511-1520..
7. **Hemingson, D., and Sarisky, M.***A Practical Comparison of Three Tetrahedral Ambisonic Microphones.* Audio Engineering Society Convention 126 : Audio Engineering Society, 2009.
8. **Cobos, M., Lopez, J. J., and Spors, S.***A sparsity-based approach to 3D binaural sound synthesis using time-frequency array processing.* Journal on Advances in Signal Processing : EURASIP, 2010. Article ID 415840, 2010..

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SIMULACIÓN DE ARRAY DE SUBWOOFER Y HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN

PACS: 43.38.-p

Sáenz de Inestrillas, Álvaro[1]; Ramos, Germán[1]; Redondo, Javier[1].
[1]Universidad Politécnica de Valencia
Calle Paranimf s/n, 46730 Gandia, Valencia, Spain
Email (1): a.inestrillas@gmail.com

## ABSTRACT

Nowadays it is common to use subwoofer arrays for big direct events. With them it is possible to obtain configurations with controlled radiation patterns like cardioid, lines, arcs, end-fire, etc., with obvious advantages in its use
.
This paper focus on the mathematical behavior of the most uses configurations in addition to openly consider to an external parameter optimization (position, rotation, gains, delays, filtering) by any method of external optimization, through a software tool. The tool allows obtain the map of radiation to selected frequencies and frequency responses to any desired position.

For the simulation of the sound field have been employed sum phasor methods and FDTD methods for later comparison, appearing in the FDTD method more similar results that subsequently measured results at considered effects such as diffraction, something to consider for these frequencies bands and sizes of boxes.

## RESUMEN

Hoy en día es habitual el uso de arrays de subgraves para grandes eventos en directos. Con ellos es posible obtener configuraciones con diagramas de radiación controlados como cardiodes, líneas, arcos, end-fire, etc., con ventajas evidentes en su uso.

Este trabajo profundiza en el comportamiento matemático de las configuraciones más empleadas, además de plantearse de forma abierta para una optimización exterior de los parámetros (posiciones, giro, ganancias, retardos, filtrado) por cualquier método de optimización externo, a través de una herramienta software. La herramienta permite obtener el mapa de radiación para las frecuencias seleccionadas y las respuestas en frecuencia para cualquier posición deseada.

Para la simulación del campo sonoro se han empleado métodos de suma de fasores y métodos FDTD para su posterior comparación, apareciendo en el método FDTD resultados más

similares a los medidos posteriormente al considerarse efectos como la difracción, algo a tener en cuenta para estas bandas de frecuencias y tamaños de las cajas.

## 1. INTRODUCCIÓN

A menudo cuando se acude a un concierto en directo se comprueba que la señal de subwoofer no llega a todos los sitios con el mismo nivel y respuesta, o que incluso esa diferencia entre zonas puede llegar a parecer ausencia de nivel. Estas impresiones, que a priori pueden parecer subjetivas, pueden conllevar a descalificaciones hacia el técnico de sonido o incluso afectar al prestigio de los propios subwoofers de una determinada marca comercial, sin ser ellos, sino la disposición de los mismos y su mala configuración, la causante de esos efectos.

Otra problemática que surge a raíz de la omnidireccionalidad que presentan este tipo de transductores, es el alto nivel de presión sonora que se crea en la parte trasera de los mismos, llenando el escenario de sonido de baja frecuencia. Este fenómeno en ocasiones puede afectar al confort de trabajo de los músicos que están actuando en el evento o incluso ser un auténtico quebradero de cabeza para el técnico de monitores debido a los posibles acoples que puede causar.

Las soluciones a estos problemas, aunque fueron descritas hace más de medio siglo por el físico Harry F. Olson en [2], no fueron utilizadas comercialmente hasta 1998, cuando Meyer Sound presentó el PSW-6 (primer subwoofer cardioide del mercado a partir del cual los demás fabricantes incorporaron sus propios modelos). Hoy en día es muy común encontrarse con arreglos cardioides de subwoofers junto con arrays en línea o haciendo arcos (tanto físicos como digitales), que controlen el haz de este tipo de altavoces. De esta forma se consigue entregar la mayor parte de energía en la dirección deseada, por lo que se pueden adecuar a cualquier tipo de escenario acústico además de minimizar la interacción del sistema con el recinto, el cual puede afectar a la inteligibilidad y la calidad de la reproducción sonora.
Sobre estas técnicas, se dispone de muy poca literatura al respecto, de forma que los ingenieros de sistemas suelen manejarlas tras la realización de cursillos, compartir experiencias con otros ingenieros que las hayan utilizado o, en innumerables casos, siguiendo las indicaciones que alguien les ha dictado sin llegar a entender el porqué de los resultados obtenidos.

A través de este trabajo se expone en primer lugar las configuraciones más empleadas enlazadas con las ecuaciones que describen el funcionamiento de las mismas, así como la simulación a través de un software creado a propósito del trabajo mediante el cual uno puede, conociendo la respuesta de un subwoofer, introducirla de forma sencilla al programa y realizar la simulación de cualquiera de las estrategias más comunes, además de poder formar las suyas propias. Este software funciona mediante la técnica de suma fasorial, y como extra otro software de simulación por diferencias finitas en tiempo (FDTD) para las configuraciones pensadas para obtener cancelaciones traseras. Por último se añade la opción de optimizar determinados parámetros para obtener un fin deseado, aunque esa parte está por el momento en vías de desarrollo.

## 2. CONFIGURACIONES TÍPICAS DE ARRAYS DE SUBWOOFERS Y RELACIÓN CON LAS TEORÍAS ACÚSTICAS

La configuración más simple se tiene cuando se dispone únicamente de dos fuentes separadas una cierta distancia "$d$" y radiando la misma presión acústica (Figura 1). Para esta configuración, la función de directividad viene dada por [2]:

$$D_\theta = \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)}{2\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta\right)} \right| \quad (1)$$

Dependiendo de la distancia de separación y la frecuencia que se emita, utilizando esta estrategia se tendrá lugares en el campo acústico donde la presión decaerá notablemente. Esto se da en las típicas configuraciones L-R. Un valor típico de separación máxima es 1m, ya que a mayor separación aparecen pasillos zonas de cancelación en el rango de funcionamiento.

La siguiente configuración, que surge de la ampliación de la anterior, es la denominada serie de fuentes puntuales, donde en lugar de disponer de únicamente dos fuentes emitiendo, se tienen un número "$n$" de fuentes (Figura 2). En este caso, el diagrama de directividad viene marcado por la expresión [2]:

$$D_\theta = \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\right)}{n sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\sin(\theta)\right)} \right| \quad (2)$$

Con este método se consigue focalizar y estrechar el haz sonoro en la parte delantera del arreglo, haciéndose más directivo cuantas más fuentes conforman el arreglo. Este arreglo es muy útil para recintos donde la audiencia se sitúe delante del escenario.

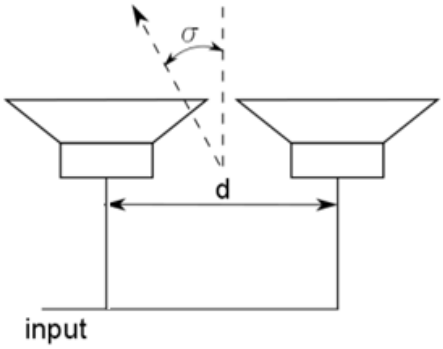



**Figura 1:** esquema de una configuración de dos fuentes

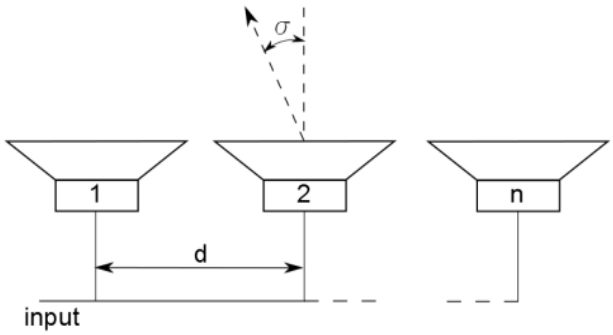



**Figura 2:** esquema de una configuración en línea

De esta última configuración surgen dos variantes. La primera de ellas trata de dirigir el haz creado hacia un determinado ángulo con respecto a su eje de simetría. Esto puede conseguirse a través de la introducción de un patrón de retardo electrónico en la excitación de las fuentes tal y como se muestra en la Figura 3.

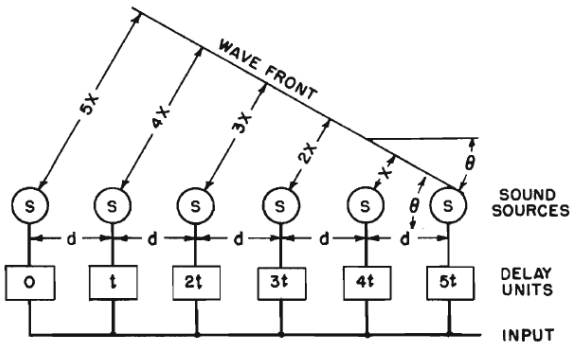



**Figura 3:** Sistema de inclinación de haz por desplazamiento de fase [2]

La otra variante lo que trata es de repartir la energía acústica conseguida con el aumento del número de fuentes a una zona más amplia ensanchando el haz realizando un arco. La función de directividad de este tipo de arreglos viene dada por [2]:

$$D_\theta = \frac{1}{2m+1}\left|\sum_{k=-m}^{k=m}\cos\left[\frac{2\pi R}{\lambda}\cos(\theta+k\alpha)\right]+j\sum_{k=-m}^{k=m}\sin\left[\frac{2\pi R}{\lambda}\cos(\theta+k\alpha)\right]\right| \quad (3)$$

Donde "$m$" es el número de fuentes, "$R$" el radio del arco formado y "$\alpha$" el ángulo que separa a dos fuentes contiguas. Para llegar a montar este tipo de arreglos, existen dos opciones: la primera es colocar físicamente las cajas acústicas formando el arco deseado; y la segunda realizando el arco electrónicamente con retardos en las señales como se muestra en la Figura 4. Este tipo de configuraciones pueden ser utilizadas en recintos donde la anchura del escenario no alcanza a abarcar toda la zona de audiencia.

A continuación se van a introducir dos de las configuraciones más comunes en el mundo del directo utilizadas para anular lo máximo posible la radiación trasera que tanto afecta al bienestar de los intérpretes. Estas configuraciones aprovechan las cancelaciones que se producen cuando dos ondas de igual frecuencia y amplitudes similares se encuentran en contrafase, lo que produce cancelaciones en dichas frecuencias.

La primera de ellas es la denominada gradiente de primer orden que se compone de dos subwoofers, uno detrás del otro, y separados una distancia "$d$". Al subgrave colocado en la parte trasera se le añade un delay electrónico correspondiente a la distancia que los separa, y se le invierte la polaridad mediante una inversión de fase. La función de directividad de este arreglo viene dada por la expresión clásica de patrones cardioides [3]. El esquema de la configuración se muestra en la Figura 5.

$$D_\theta = \left|\sin\left[\frac{\pi d}{2\lambda}(1+\cos\theta)\right]\right| \quad (4)$$

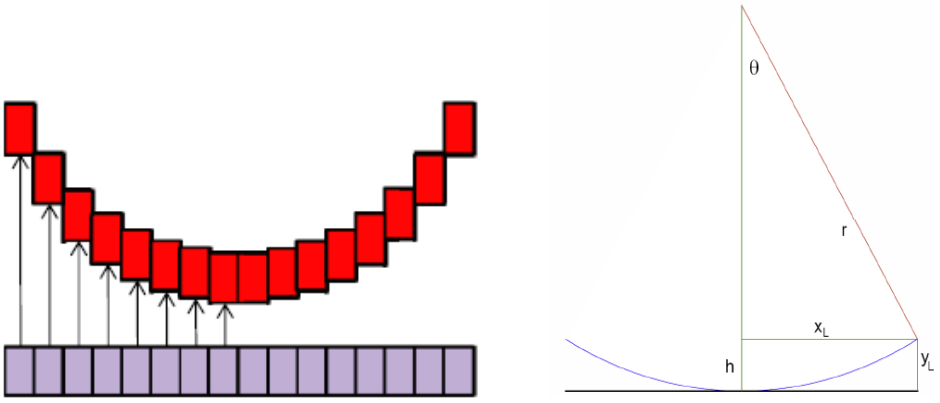



**Figura 4: a)** esquema de una configuración en arco a partir de un arreglo en línea [10] **b)** parámetros con los que configurar un arreglo de arco [10].

La distancia de separación entre altavoces suele escogerse de forma que sea "$^1/_4\,\lambda_{ref}$". "$\lambda_{ref}$" se escoge de forma que sea la mitad de la frecuencia máxima de funcionamiento del subgrave (puede ser la frecuencia del filtro de cruce también), aunque a veces la distancia que se obtiene de separación es inferior al tamaño de las cajas de los altavoces y no es posible, con lo que es necesario escoger una distancia mayor.

En la parte trasera del arreglo, la señal emitida por el altavoz delantero llega con un retraso general igual a la distancia de separación de los altavoces, pero como el altavoz trasero tiene un retardo introducido que coincide con esa distancia, las señales están en fase. Ahora cabe recordar que en este tipo de arreglos, el altavoz trasero tiene un cambio en la polaridad (la señal está invertida), por lo tanto, las señales están en contrafase y se produce.

En la parte delantera sin embargo ocurre otro fenómeno. La señal emitida por el altavoz trasero llega con un retraso igual a la distancia de separación, más el retraso introducido, con lo cual, se han desplazado electrónicamente los altavoces a una distancia doble, que con el cambio de fase, produce una cancelación en la parte delantera a la frecuencia que se corresponde con esa longitud de onda y sus múltiplos impares, es decir, al doble de la frecuencia de referencia ocurre la primera cancelación. Puede obtenerse las frecuencias de cancelación a través de:

$$f_n = \frac{2n-1}{2d} c_0 \qquad con\ n = 1,2,3,\ldots \quad (\mathbf{5})$$

Sin embargo, a la frecuencia de referencia las señales están en fase con lo que hay un aumento de nivel de “6dB”. Para las demás frecuencias también hay diferencia de fase pero no es significativa. Por lo tanto, la elección de la distancia de separación es crucial y debe hacerse siguiendo los criterios descritos en este apartado.

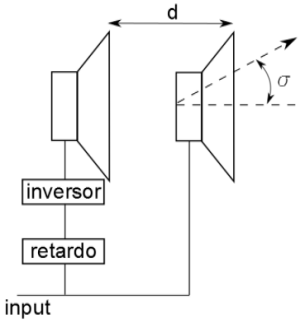



**Figura 5:** Esquema de una configuración gradiente de primer orden

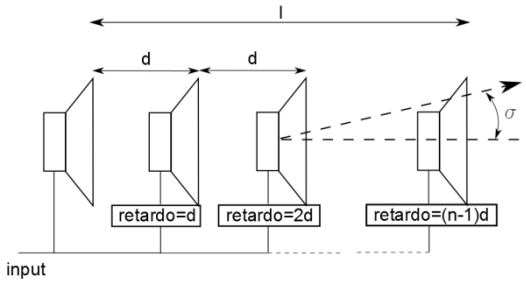



**Figura 6:** Esquema de una configuración

Por último, otra de las configuraciones típicas para conseguir cancelación trasera es la técnica denominada End-Fired. Una configuración End-Fired es aquella en la cual se utiliza un retraso progresivo de fase entre los elementos de una línea. En el caso en que el tiempo de retraso se corresponda con el tiempo de propagación de la onda acústica en el espacio para esa distancia, la máxima directividad ocurre en la dirección correspondiente a la línea que une los elementos. En la Figura 6 se muestra un esquema de esta configuración. La directividad de esta configuración se describe a través de [2]:

$$D_\theta = \left| \frac{\sin\frac{\pi}{l}(l - \cos(\theta))}{\frac{\pi}{l}(l - lcos(\theta))} \right| \qquad (\mathbf{6})$$

En la parte frontal de este tipo de arreglos, dado que a cada fuente se le introduce un retardo igual a la distancia de separación de cada altavoz con respecto al altavoz más retrasado, se tiene una suma en toda la banda obteniendo un aumento de nivel que depende del número de fuentes.

En la parte trasera es donde las distancias entre fuentes comienzan a tomar sentido. Imaginando un sistema de cuatro elemento de longitud total 3.44m=$\lambda_{100Hz}$, y separación entre

cada elemento de 1.15m. La distancia del primero al segundo altavoz sería 1.15m pero como al segundo altavoz se le aplica un retardo correspondiente a esa distancia, virtualmente están separados 2x1.15=2.3m. Siguiendo (5), la frecuencia a la que existe un desfase de 180º cuando las fuentes distan esa distancia es 75Hz y sus múltiplos impares. La distancia del primero al tercer altavoz con el retardo incluido sería de 4.6m, con lo que la cancelación se produciría a la frecuencia 37Hz y sus múltiplos impares, con lo cual se produciría cancelación a la frecuencia 111Hz (37x3=111Hz). Por último, la distancia de separación total entre los altavoces más alejados sería de 6.88m, lo que produciría cancelación a las frecuencias 25Hz,75Hz,125Hz,... Las frecuencias de cancelación dependiendo de la distancia de cada altavoz al altavoz de referencia vienen determinadas por:

$$f_n = \frac{2n-1}{4d} c_0 \qquad con\ n = 1,2,3,\ldots \qquad (7)$$

## 3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo se han realizado dos tipos de simulaciones que utilizan técnicas diferentes. El uso de cada una depende de las necesidades y el tiempo requerido por el usuario ya que la técnica de suma fasorial apenas consume recursos en comparación a la simulación por diferencias finitas. Cabe destacar que dichos programas han sido diseñados para su uso exclusivo con altavoces de baja frecuencia (hasta 200Hz).

El software que utiliza la primera de las técnicas mencionadas, suma de fasores, consta de varias funciones a través de las cuales se obtienen los resultados de forma casi inmediata. Dispone de una función que crea las configuraciones de arrays anteriormente citadas de forma automática simplemente introduciendo qué tipo se desea simular, en qué posición del espacio de simulación se desea colocar el centro del arreglo, la separación entre las fuentes, número de altavoces involucrados y, para los arreglos de tipo “haz” y “arco” anteriormente descritos, los grados de curvatura que se desean. Una vez se tiene el tipo de arreglo que desea simularse configurado, se pasa a la función que realiza la simulación propiamente dicha a la que únicamente hay que introducirle las dimensiones del espacio de simulación, frecuencia a la que realizar la visualización, el archivo que contiene los altavoces ya configurados en función del arreglo seleccionado y las posiciones de captura de datos. En el caso de querer realizar la captura a lo largo de una circunferencia, también se dispone de una función que realiza el cálculo de las posiciones exactas a través del número de puntos requerido y el radio especificado. Como ventaja de este software con respecto a otros que existen gratuitos proporcionados por marcas de cajas electroacústicas, cabe destacar que en este es posible introducir cualquier subwoofer de forma sencilla simplemente conociendo su respuesta en frecuencia con una rotación de 360º a resolución de 1º. Este software trabaja a través de estructuras donde almacena los datos de cada altavoz y sus parámetros de forma que sea sencillo para él procesar los datos aunque haya cambios. Además es capaz de realizar simulaciones en las cuales se desea algún procesado de la señal, ganancia y retardos generales, inversión de fase o incluso rotación del altavoz. Por último, el otro punto fuerte de este programa es la posibilidad de introducir una función de optimización de parámetros en función de un objetivo. Para este trabajo se ha comenzado utilizando algoritmos genéticos pero esta función está todavía en desarrollo. La mayor limitación de este software es la carencia de contemplar las dimensiones de las cajas y por lo tanto la difracción que producen en las ondas acústicas.

Para solventar el problema del software anterior, se recurre al método FDTD con otro programa. Este segundo software está preparado para realizar la simulación de las configuraciones gradiente de primer orden y end-fired. Para ello basta con introducir el tipo de arreglo, la distancia entre el arreglo y las posiciones de captación, así como el número de posiciones de dichas capturas, número de altavoces en el arreglo y la separación entre ellos.

En este caso, para la creación de las estructuras que contienen los parámetros de los subgraves, se introduce la dimensión de dichas cajas, la orientación de cada una de ellas (si es hacia derecha o hacia izquierda), la posición, número de altavoces dentro de la caja acústica, así como sus pulgadas, y los valores de ganancia, retardo o inversión de fase. Como limitaciones de este segundo programa se tiene que únicamente es válido para simular las difracciones de la onda ya que no realiza una simulación real de un altavoz y que los tiempos y recursos de cómputo son mucho más elevados.

## 4. RESULTADOS

Para realizar las simulaciones se ha supuesto un subwoofer cuya respuesta en frecuencia es la mostrada en la Figura 7.

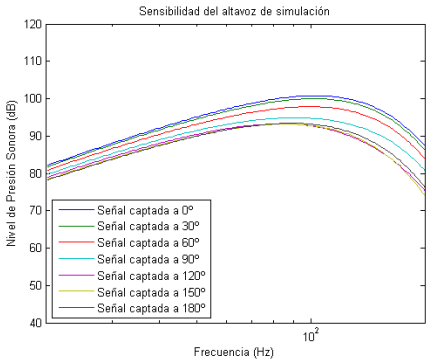



**Figura 7:** Nivel de presión sonora que genera el altavoz de simulación a 1m de distancia de su centro

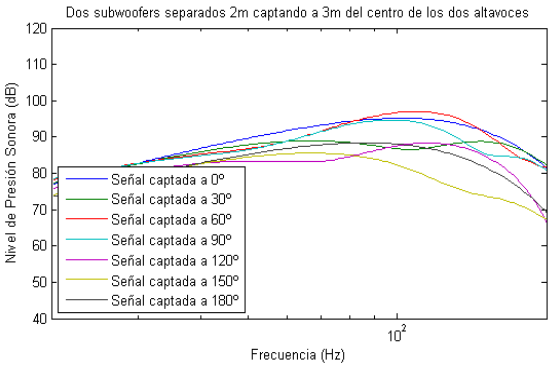



**Figura 8:** Respuesta en frecuencia recibida a 3m de un sistema de dos altavoces separados 2m

Como primera simulación se utiliza la configuración de dos subwoofers separados 2m y capturando las señales a 3m del centro del arreglo. El resultado se muestra en la Figura 8. En dicha figura puede verse como dependiendo del ángulo las señales se deforman con respecto a las mostradas en la Figura 7.

En la Figura 9 se muestra la respuesta obtenida a diferentes ángulos para una configuración de 8 subgraves con una separación de 1m entre ellos, la respuesta para un direccionamiento de haz a 60º creado con una línea de 6 cajas acústicas y la respuesta para un arco de 120º con 8 subwoofers. En la Figura 9a se muestra cómo el haz acústico está focalizado en 0 º y 180 º mientras que en los laterales las señales están distorsionados con respecto a las originales. En la Figura 9b puede observarse como para el ángulo 60º es donde se tiene el mayor nivel de presión en el campo sonoro, con lo que los parámetros del arreglo son correctos también (los valores de retardo dados por el software de simulación son 0ms, 2.5ms, 5.0ms, 7.5ms, 10.1ms y 12.6ms). Para el arreglo en arco, puede observarse en la Figura 9c que los niveles a diferentes ángulos son más parecidos entre sí que en las demás respuestas, por lo que el arreglo realiza la función para la que ha sido desempeñado (los valores de retardo desde los dos altavoces centrales hacia los situados en los extremos son 0ms, 0.4ms, 1.8ms y 5.0ms respectivamente). Aunque es cierto que la señal general se ha visto deformada y tiene menos nivel en general.

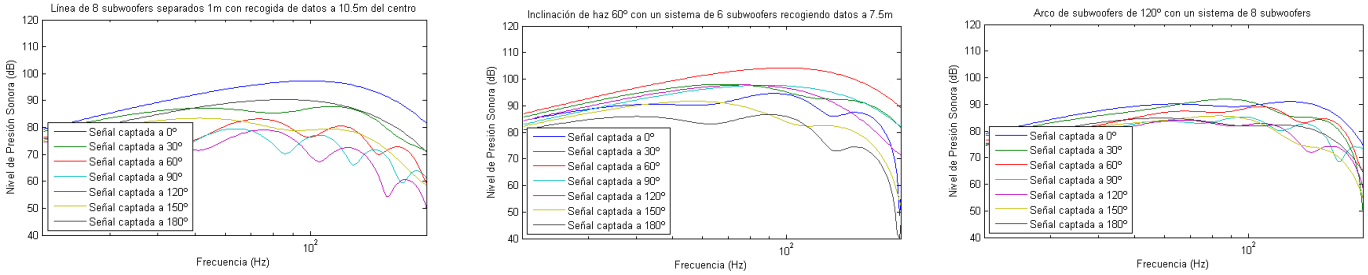



**Figura 9: a)** configuración en línea de 8 subwoofers separados 1m entre ellos y medidos a 10.5m **b)** configuración de 6 subwoofers con inclinación de haz a 60º recogiendo datos a 7.5m **c)** configuración de 8 subwoofers en arco de 120º capturando a 10.5m del arreglo.

En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos para una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m tanto con la técnica de suma de fasores (Figura 10a) como con FDTD (Figura 10b). Tanto en la Figura 10a como en la Figura 10b puede observarse que el nivel de presión radiado a la parte trasera del arreglo ha disminuido con respecto al que se tenía inicialmente en la Figura 5 (35dB para suma de fasores y 15dB para FDTD). Sin embargo los valores obtenidos con FDTD muestran que la atenuación conseguida no es tan elevada como la que se obtiene a través de la primera estrategia, lo cual es más parecido a los casos reales ya que contempla la difracción que producen las cajas. Los resultados mostrados se han conseguido con un retraso de 2.5ms para la primera técnica y 2.6ms para la segunda.

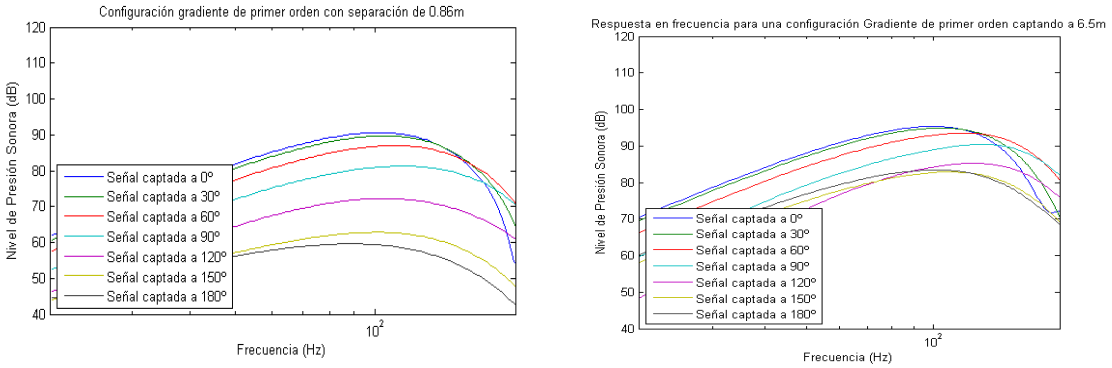



**Figura 10: a)** simulación con suma fasorial de una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m entre ellos y tomando datos a una distancia de 6.5m **b)** simulación FDTD de una configuración gradiente de primer orden con dos subwoofers separados 0.86m entre ellos y tomando datos a una distancia de 6.5m.

Por último, en la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para un arreglo end-fired de 4 elementos separados 1.15m entre ellos. Como puede verse, las dos imágenes son muy parecidas aunque de nuevo se tiene mayor atenuación a través del método de suma fasorial pero son más fiables los datos conseguidos con FDTD (20dB con suma fasorial y 15dB con FDTD a 100Hz). Los valores de retardos a introducir en ambos casos son idénticos (3.3ms, 6.7ms y 10ms).

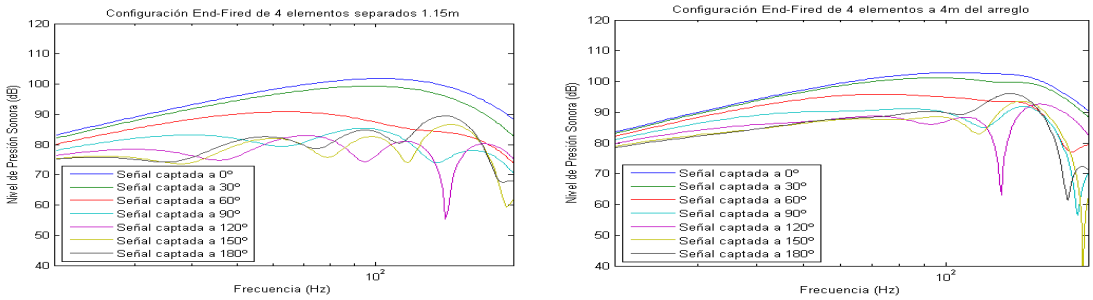



**Figura 11: a)** simulación con suma fasorial de una configuración end-fired de 4 subwoofers separados 1.15m medido a 4m del arreglo **b)** simulación FDTD de una configuración end-fired de 4 subwoofers separados 1.15m y medido a 4m del arreglo.

## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Cuando se conforman sistemas de reproducción de dos subgraves, no deben separarse más de 1m para evitar que surjan pasillos en la zona de audiencia donde el nivel decaiga con notoriedad.

Con configuraciones de subwoofers puede hacerse una focalización del sonido hacia la zona central, dirigiéndolo con un determinado ángulo, o incluso volver a abrir el haz para cubrir una mayor zona, simplemente actuando sobre las fases de las señales que se entregan a cada dispositivo.

Además pueden realizarse configuraciones que anulan la radiación trasera limpiando de sonidos molestos la zona de los intérpretes.

A través de los dos softwares de simulación creados para este trabajo se tienen unas potentes y rápidas herramientas para realizar las diferentes configuraciones de arrays de subwoofers y crear nuevas de forma sencilla, siendo la simulación FDTD la más fiable para las configuraciones cardioides, al contemplar los efectos de difracción. Aunque podría mejorarse su manejo a través de una interfaz de usuario. También son herramientas potentes ya que tienen la posibilidad de introducir funciones de optimización, aunque en este trabajo se haya quedado esa parte sin profundizar, pero que queda como línea futura de trabajo. Como falla general para los dos programas, cabe destacar que en ninguno de los dos se tiene en cuenta las 3 dimensiones de los altavoces que pueden jugar un papel importante.

Por último, es necesario realizar mediciones reales para poder corroborar los resultados obtenidos en simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Lawrence E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics* – Fourth Edition
[2] Harry F. Olson, *Acoustical Engineering* – Second Edition
[3] Martyn “Ferrit” Rowe, *Subwoofer Directivity – 29 Dec 2013*
[4] Bob McCarthy, *Sound Systems: Desing and Optimization. Modern Techniques and Tools for Sound System Design and Alignment – Second Edition*
[5] Olivier Le Bot, *Low Frequency Directivity Control* – Aalborg Universitet 2010
[6] Francisco Javier Redondo Pastor, *Apuntes de Técnicas de Simulación en Acústica*

[7] Alan V. Oppenheim, *Señales y Sistemas* – Segundo Edición
[8] http://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Ricker-wavelet
[9] Meyer Sound, *Subwoofer Coupling with Surface* – 2000
[10] Excelsior Audio, *Subwoofer Arrays & Applications* – 131st AES Convention – New York, October 2011
[11] Joan La Roda, *Ajuste de Configuraciones Cardioides de Subgraves* – DAS Audio 2009
[12] http://www.ispmusica.com/articulo.asp?id=605
[13] Marcos Gestal, *Introducción a los Algortitmos Genéticos y la Propagación Genética* – Universidade Da Coruña 2010

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ONVIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA MATLAB PARA LA REPRODUCCIÓN DE AUDIO ESPACIAL EN TIEMPO REAL

PACS: 43.60.-c

Maximo Cobos[1], Gabriel Moreno[1], Jesus Lopez-Ballester[1], Pablo Gutierrez-Parera[2], Irene Martin-Morato[1], Jaume Segura[1] y Ana M. Torres[3]
[1] SPAT - Universitat de Valencia, Avd. de la Universitat s/n, 46100 Burjassot, España
[2] iTeAM, Universitat Politecnica de Valencia, Cno. de Vera s/n, 46022 Valencia, España
[3] IEEAC, Universidad de Castilla La Mancha, 16071 Cuenca, España
E-mail: Maximo.Cobos@uv.es

## ABSTRACT

Spatial audio has been a topic of intensive research in the last decades. Although there are many tools available for developing real-time spatial sound systems, most of them work under audio-oriented frameworks. However, despite a significant number of signal processing researchers and engineers develop their algorithms in MATLAB, there is not currently any MATLAB-based tool for rapid spatial audio system prototyping and algorithm testing. This paper presents a tool for spatial audio research and education under this framework.

The presented tool provides the user with a friendly graphical user interface (GUI) that allows to move freely a number of sound sources in 3D and to develop specific functions to be used during their reproduction.

## RESUMEN

El audio espacial ha sido un tema de intensa investigación en las últimas décadas. Aunque hay muchas herramientas disponibles para el desarrollo de sistemas de sonido espacial en tiempo real, la mayoría de ellas trabajan bajo entornos de audio orientado. Sin embargo, a pesar de que un importante número de investigadores e ingenieros de procesado de señales desarrollan sus algoritmos en MATLAB, no hay actualmente ninguna herramienta basada en MATLAB para el testeo de algoritmos y la creación rápida de prototipos de sistemas de audio espacial. Este artículo presenta una herramienta para la investigación y la educación en el campo del audio espacial.

a herramienta presentada proporciona al usuario una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite mover libremente una serie de fuentes de sonido en 3D y desarrollar funciones específicas que se utilizarán durante su reproducción.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho bien conocido que audio espacial ha sido un tema de intensa investigación en las últimas décadas. Además de las técnicas estereofónicas y de sonido envolvente convencionales, se han propuesto una serie de diferentes enfoques para mejorar la reproducción de sonido espacial por altavoces y auriculares. En los últimos años, las técnicas de paneo avanzado como Vector Base Amplitud Panning (VBAP) [1] y métodos de síntesis de campo sonoro, como Wave Field Synthesis (WFS) [2] y Ambisonics [3] han atraído la mayor parte de la atención.

Hay muchas herramientas disponibles para el desarrollo de sistemas de sonido espacial en tiempo real, la mayoría de ellos trabajando bajo entornos de audio orientado como Pure Data [4], MAX MSP [5] o SuperCollider [6]. SoundScape Renderer (SSR) [7], que es un software de código abierto para la reproducción de audio espacial, ha demostrado ser una herramienta muy útil para la comunidad científica, permitiendo a los investigadores para llevar a cabo experimentos teniendo en cuenta los métodos de reproducción de audio espaciales más populares.
Sin embargo, a pesar de que un importante número de investigadores e ingenieros de procesado de señales desarrollan sus algoritmos bajo MATLAB, no hay actualmente ninguna herramienta basada en MATLAB para la creación rápida de prototipos de sistemas de audio espacial. MATLAB ofrece un excelente entorno de desarrollo para el procesado de señales, sin embargo, la grabación de audio en tiempo real y reproducción sobre MATLAB ha sido tradicionalmente un problema. Recientemente se ha incorporado el streaming de audio en tiempo real mediante el soporte de ASIO [8] (drivers reconocidos de baja latencia) a este software, proporcionando una buena oportunidad para probar algoritmos de audio espacial bajo un marco común.
Por otra parte, la programación orientada a objetos (OOP) permite el nivel de versatilidad y la abstracción necesaria para crear una herramienta general de reproducción de audio.

Este artículo presenta una herramienta basada en MATLAB para la educación e investigación de audio espacial. Se hace uso del “DSP System Toolbox” [9] de MATLAB, que proporciona las funcionalidades necesarias para la gestión de objetos de audio en tiempo real. La herramienta presentada proporciona al usuario una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite mover libremente un número de fuentes de sonido en 3D considerando cualquier configuración de altavoces. Los métodos de procesado de señales que se utilizan para reproducir una escena de sonido dada son independientes del resto de la herramienta. Por lo tanto, el usuario puede desarrollar funciones específicas que se utilizarán durante la reproducción de fuentes de sonido virtuales. La configuración inicial especifica, entre otra información, la ubicación de los altavoces y la posición inicial de las fuentes virtuales, los archivos de audio asociados y el método de reproducción de audio seleccionado. La interfaz de la GUI se construye directamente desde la configuración inicial especificada cuando se inicia la herramienta. Muestra la configuración seleccionada tanto en vista en planta y perfil, permitiendo al usuario arrastrar y soltar las fuentes virtuales o insertar directamente una posición deseada mediante el ratón. Las fuentes pueden ser también silenciadas durante la reproducción.

Actualmente, la herramienta implementa algunas de las técnicas de reproducción de audio más populares: Binaural, VBAP y Ambisonics Amplitud Panning (AAP) [10]. Si bien pueden existir algunas limitaciones al utilizar MATLAB en lugar de otros entornos orientados a audio, esta herramienta ofrece una solución muy útil para la prueba rápida de algoritmos y el desarrollo de pruebas de concepto. Por otra parte, puede ser también muy útil en la educación para la práctica en conferencias y laboratorios, donde los estudiantes pueden mejorar sus habilidades de procesamiento de audio al escuchar directamente al resultado de sus funciones desarrolladas para audio espacial. Aunque la herramienta puede ser enriquecida con nuevos algoritmos y funcionalidades, la situación actual ya muestra un gran potencial para el avance de la investigación de audio espacial.

## 2. ARQUITECTURA DE SOFTWARE

Todo el código ha sido desarrollado bajo MATLAB mediante el uso de una interfaz gráfica de usuario y sus funcionalidades OOP. El uso de MATLAB en la comunidad de investigación es altamente extendida ya que ofrece una plataforma independiente que permite que la herramienta se ejecute bajo diferentes sistemas operativos. Los flujos de audio son gestionados por la herramienta “DSP System Toolbox", que permite la reproducción de audio en tiempo real y la grabación utilizando diferentes tipos de controladores de audio. En cualquier caso, los controladores ASIO son muy recomendables para tratar con múltiples canales de audio con baja latencia. Para una asignación adecuada de los canales de audio en esta herramienta, se necesita la versión 2013b de MATLAB. Además, muchas de las funciones de representación hacen uso de la herramienta “Signal Processing Toolbox”. Hay que tener en cuenta que las dos herramientas se incluyen en la versión estándar. El proyecto está organizado en diferentes directorios que contienen los scripts y funciones necesarios. Todos los nombres de los archivos han sido cuidadosamente seleccionados para ser reconocidos fácilmente.

### 2.1. Niveles de software

La Figura 1 muestra una representación general de los diferentes niveles de software involucrados. En el nivel superior, la interfaz gráfica de usuario ofrece las funcionalidades de interacción del usuario. A continuación, DATA y HANDLES (que son gestionados por “guidata” y “guihandles”) almacenan los parámetros necesarios durante la reproducción y los objetos gráficos, respectivamente. En el mismo nivel, tenemos objetos que son requeridos tanto para audio como para gestión gráfica, todos ellos con funcionalidades de POO.

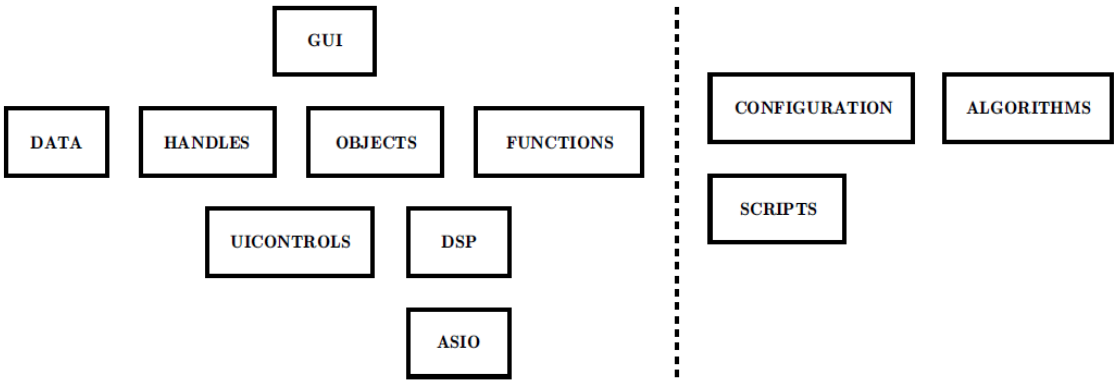



Figura 1. Niveles de software.

Además, las funciones necesarias para el funcionamiento de todos los elementos están incluidas en este nivel. En este nivel, nos encontramos con los UICONTROLS de MATLAB y la biblioteca DSP, que ambos son utilizados por los niveles superiores. En el nivel inferior, se encuentran los controladores de audio ASIO que se comunican con el hardware de audio. Aparte de estos niveles, CONFIGURATION y SCRIPTS se utilizan para cargar y guardar la configuración de la reproducción. Los algoritmos, (ALGORITHMS) son funciones independientes que el usuario puede modificar libremente o implementar nuevos, para añadir más funcionalidades a la herramienta.

### 2.2. Configuración de la Escena de Audio

Para iniciar la interfaz gráfica de usuario se necesita una estructura inicial de configuración de MATLAB. Esta estructura contiene todos los parámetros que describen la configuración de reproducción deseada, como la dimensión de la escena de audio, el método de representación, la asignación de canales, etc. Uno de los parámetros más importantes son las posiciones de los altavoces y las fuentes de audio. La estructura puede ser generada fácilmente por una función MATLAB que se puede modificar para adaptarse a las necesidades del usuario. Diferentes configuraciones de altavoces y fuentes de sonido se pueden cargar directamente gracias a esta función. El usuario puede generar sus propios scripts que contengan la posición inicial de las fuentes y los altavoces. Esta es una manera muy fácil de gestionar el sistema de configuración inicial de los usuarios estándar de MATLAB.

### 2.3. Renderizado

El procesado de las señales de audio correspondientes a las diferentes fuentes se realiza en tiempo real y es reproducido por los altavoces en consecuencia para el método de representación seleccionada. Cada vez que se inicia la herramienta, se selecciona un método de representación según lo especificado por la estructura de configuración inicial. Como siempre, esto puede ser modificado por el usuario sin cerrar el programa siempre que la reproducción de audio se detenga y la configuración de reproducción permita el método de representación seleccionado (por ejemplo, la reproducción binaural no se puede seleccionar si el número de altavoces es mayor que dos).

Uno de los aspectos más interesantes de esta herramienta es que el usuario puede desarrollar funciones adicionales correspondientes a nuevos métodos de representación e incorporarlas a este software sin esfuerzo o cambiando el resto del código, ya que la arquitectura ha sido creada atendiendo al máximo al patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) [1]. En nuestro entorno, el modelo, que está formado por los diferentes algoritmos de representación, está completamente separado de la interfaz gráfica y el núcleo de audio. Para añadir un nuevo método de representación, es suficiente seguir los parámetros de entrada-salida solicitada de la estructura por defecto y que se seleccione antes de la reproducción. Para mantener este concepto independiente de las principales funciones de gestión de audio, la salida del método de representación debe ser una matriz de dimensiones Ms x L donde Ms es el número de altavoces seleccionados que contribuyen al renderizado y L la longitud del filtro. Por otra parte, se debe proporcionar un vector de dimensiones Ms x 1, especificando los índices de los altavoces activos para la fuente. Hay que tener en cuenta que para los algoritmos basados en paneo, L es siempre 1 (se utilizan coeficientes escalares de amplitud en lugar de respuestas impulsionales). Los coeficientes del filtro para cada altavoz y la fuente de sonido se almacenan en los datos de la GUI. De esta manera, la interfaz gráfica de usuario es totalmente independiente de la Método de renderizado seleccionado.

La Figura 2 muestra un esquema general de las etapas de procesado que sigue la herramienta. Las señales de las fuentes de entrada $x_k\,[n]$, $k = 1, \ldots, K$, correspondientes a las K fuentes de la escena de audio, son procesadas por los filtros $H_{km}\,(\omega, \theta_k, \phi_k)$ en relación con cada uno de los altavoces M en el setup, donde $\theta_k$, $\phi_k$ *y rk* son las coordenadas esféricas, azimut, elevación y radio, de la fuente. Antes de filtrar, se aplica un factor de atenuación con la distancia $\alpha(r_k)$ aplicando la regla de atenuación *1/r*. Debemos destacar que el diagrama representado en la Figura 2 es una generalización del modo de funcionamiento de la herramienta en el sentido de que todos los altavoces se representan como altavoces contributivos. Sin embargo, para cada fuente de sonido, no todos los altavoces en la configuración están contribuyendo a la síntesis de dicha fuente, por lo que el filtrado se realiza internamente sólo para los altavoces seleccionados según lo especificado por el algoritmo de renderizado.

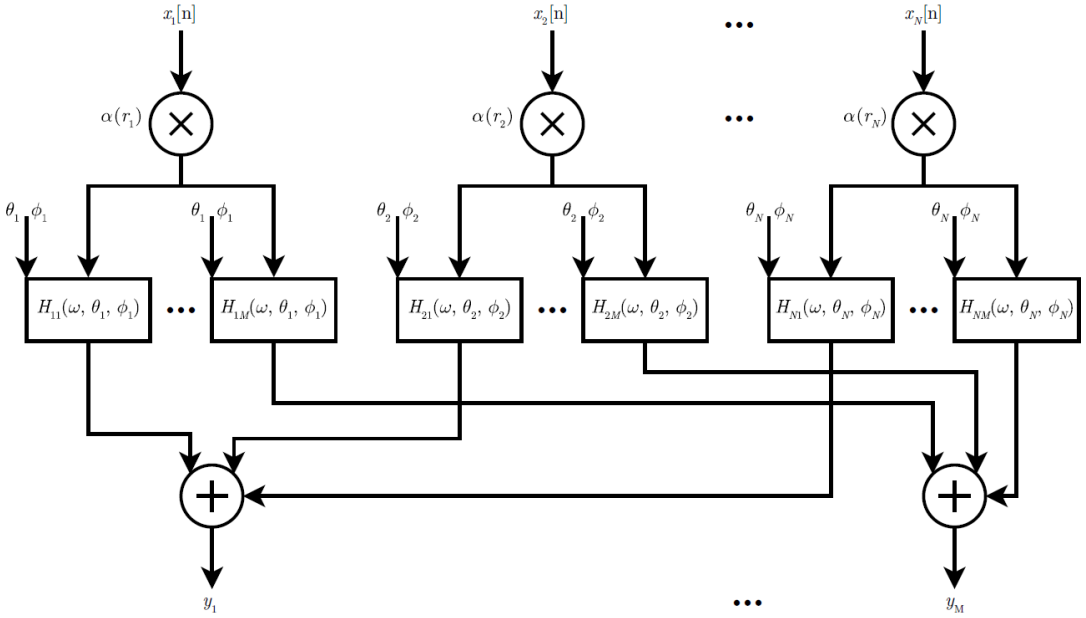



Figura 2. Flujo general de las señales.

### 2.4. Audio Streaming

Una de las bibliotecas clave de esta herramienta es la biblioteca de MATLAB “DSP System Toolbox”, especialmente el modelo “Signal Import and Export Model”. En esta toolbox, los objetos de audio de entrada (fuentes) se adquieren por medio de la clase dsp.AudioFileReader, mientras que los objetos de salida de audio (altavoces) utilizan la clase dsp.AudioPlayer. Se debe tener en cuenta que para sintetizar directamente una entrada de audio en vivo en lugar de leer desde un archivo de sonido grabado, será requerida la clase dsp.AudioRecorded.
Para evitar “clics” en el audio al cambiar los parámetros de renderizado, el sistema maneja tramas de audio consecutivas utilizando desvanecimiento cruzado o cross-fading. Se trata de un enfoque similar al seguido en el SSR [7]. Una trama dada se procesa con los parámetros actuales de representación en el instante de tiempo *n* y con los parámetros de renderizado anteriores en el *n-1*. Las salidas resultantes se cruzan, con pendientes de desvanecimiento en forma de coseno. Por otra parte, para evitar cambios muy bruscos de parámetros, un leve factor de memoria está incluido en el procesdo, por lo que los parámetros de renderizado finales en un instante de tiempo dado son una mezcla de los parámetros anteriores y actuales. Dependiendo de este factor de memoria, puede cambiar el tiempo requerido para actualizar totalmente los parámetros en la salida de audio.

### 2.5. Administración de recursos

La herramienta ofrece la posibilidad de modificar los parámetros de procesado de señales y opciones de visualización con el fin de optimizar los recursos de la plataforma de ejecución. Este es un tema importante, ya que, siempre y que el número de fuentes y altavoces se aumenta, el coste computacional también se ve afectado sustancialmente, tanto en términos de procesamiento de señal como de visualización. Esto es especialmente importante en el último caso debido a las limitaciones de MATLAB para el manejo de muchos objetos gráficos en tiempo real.

### 2.6. Inicialización de la GUI

La función principal que inicia la herramienta iniciar la herramienta también es responsable de cargar todos los objetos gráficos (y no gráficos) del sistema según lo especificado por la estructura de configuración inicial. Una vez que la configuración de escena se ha cargado, los objetos gráficos que representan los altavoces se colocan en la interfaz gráfica de usuario en dos vistas: una vista de la planta (proyección *xy*) y una vista de perfil (proyección *yz*).

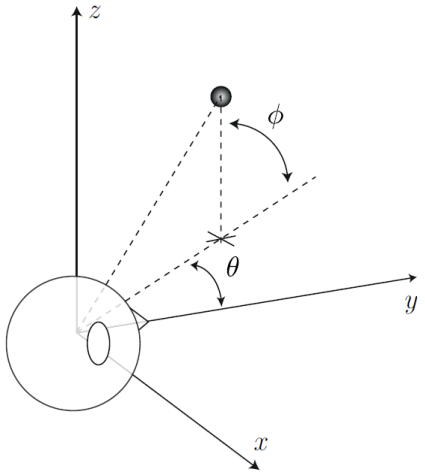


Figura 3. Sistema de coordenadas utilizado.

El sistema de coordenadas seguido en el posicionamiento de los diferentes elementos debe tenerse en cuenta cuidadosamente. El centro del sistema de coordenadas es siempre la cabeza del oyente, con el aumento de x en la dirección de la oreja derecha, y el aumento en la dirección delantera y z creciente hacia el techo. Sin embargo, los ángulos de azimut y elevación no siguen su correspondencia habitual a las coordenadas cartesianas, ya que, por razones de simplicidad y de acuerdo a la literatura de audio espacial, la dirección del azimut cero, $\theta = 0$ está en el frente del oyente y aumenta en sentido antihorario. El ángulo de elevación cero está en el plano *xy* y aumenta hacia el eje *z*. La Figura 3 muestra la correspondencia de las coordenadas esféricas y cartesianas. El radio *r* es siempre la distancia al centro del sistema de coordenadas.

La herramienta presentada tiene la capacidad de crear escenas de sonido, tanto en 2 como en 3 dimensiones. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, dependiendo del método de representación seleccionado, sólo podrán ser representadas escenas de dos dimensiones. Esto se comprueba en la inicialización, que muestra una advertencia / error si la configuración de origen especificada no es compatible con el método de representación.

## 3. MÓDULOS DE RENDERIZADO.

Esta sección describe los diferentes métodos de renderizado que se implementan actualmente en la herramienta presentada.

### 3.1. Sonido Binaural.

Para sintetizar escenas de sonido binaural, se debe especificar en el conjunto de datos una función de transferencia relativa a la cabeza, Head-Related Transfer Function (HRTF) [12] en lo sucesivo. Para este fin, el archivo de configuración debe almacenar los nombres de los archivos que contienen las respuestas impulsionales relativas a la cabeza, Head-Related Impulse (HRIRs), y sus direcciones asociadas. Obviamente, este método de representación sólo utiliza dos altavoces (auriculares), pero permite la reproducción de una escena 3D. Los objetos de filtrado se crean teniendo en cuenta las indicaciones de las fuentes y las instrucciones disponibles en el conjunto de datos HRTF. La herramienta selecciona el HRIR más cercano a la posición de la fuente en el conjunto de datos y filtra la señal de la fuente en consecuencia.

Actualmente, el sistema no interpola las respuestas, pero se realiza un proceso fade-in / fade-out aplicado a los flujos de audio que proporciona cierta interpolación. Como un ejemplo, la herramienta sí que implementa la síntesis mediante el uso del conjunto de datos KEMAR del MIT [14]. Teniendo en cuenta el proceso seguido para incorporar este conjunto de datos, cualquier otro conjunto de datos disponibles se puede incorporar fácilmente. Hay que tener en cuenta también que la mayoría de conjuntos de datos de HRTF no incluyen información de la distancia, de modo que sólo se aplica a la señal de entrada un factor de atenuación de acuerdo con su distancia al oyente.

### 3.2. Vector Base Amplitude Panning.

VBAP es un método basado en el paneo de amplitud según el posicionamiento de una fuente virtual 3D. Se puede entender como una generalización de panoramización estéreo a 3D considerando tripletes de altavoces. Básicamente, después de seleccionar el triplete de altavoces que contiene la dirección de la fuente, el vector que apunta a la fuente se proyecta sobre las direcciones de los altavoces que forman el triplete. Los coeficientes resultantes son los que se utilizan para realizar el paneo de amplitud. Una vez más, un factor de atenuación se tiene en cuenta para simular la distancia a la fuente virtual.

### 3.3. Ambisonics Amplitude Panning.

Ambisonics es una técnica de espacialización de sonido basado en la descomposición armónica esférica del campo de sonido. Esta herramienta implementa AAP, que realiza un panning simultáneo de la fuente mediante el uso de todos los altavoces disponibles en la configuración de la reproducción. Para implementar esta técnica correctamente, todos los altavoces en la configuración deben tener la misma separación angular en un círculo con el centro situado en la cabeza del oyente (si este no es el caso, la herramienta notificará una advertencia). La prestación es similar a la utilizada en SSR que utiliza la función de desplazamiento que se describe en [13].

## 4. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

La interfaz gráfica de usuario (ver Figura 4) representa el entorno que permite la interacción del usuario. Por lo tanto, se ha prestado especial atención a todos los aspectos relacionados con el diseño de esta interfaz. Como resultado, la interfaz gráfica de usuario ofrece un aspecto muy simple, con cajas de entrada que muestran las ubicaciones de origen y que permiten modificar las posiciones actuales en cualquier momento. De hecho, la interfaz es tan simple que cualquier usuario inexperto puede interactuar fácilmente con las diferentes fuentes en tiempo real desde el primer contacto. El usuario puede mover las fuentes, ya sea arrastrando y soltando o utilizando los cuadros de texto de entrada. La entrada se puede proporcionar tanto en coordenadas cartesianas como esféricas (véase la Sección 2.6 para más detalles).

La función de arrastrar y soltar es una de las principales ventajas de la herramienta, ya que, además de ser más intuitiva, por lo general es el método preferido para la interacción del usuario. Sin embargo, este tipo de control no es tan eficiente implementado en MATLAB y consume una gran cantidad de recursos, por lo tanto se ha tenido especial cuidado en la aplicación de tal función. Los objetos gráficos están relacionados entre sí de modo que, si uno de ellos sufre un cambio, este afecta de forma instantánea los otros en tiempo real. Esto permite al usuario conocer con exactitud la posición real de cada fuente en cualquier momento.

Un aspecto relevante a destacar de esta interfaz gráfica es que se sigue un enfoque programático completo en lugar de utilizar la herramienta "GUIde" habitual de MATLAB. Como resultado, la interfaz gráfica de usuario es construida totalmente al iniciar la herramienta según lo especificado por la estructura de configuración inicial, ubicando los objetos gráficos según la configuración de la escena y reproducción de sonido previsto.

Los altavoces son representados por círculos negros marcados con su número de canal de audio correspondiente. El cambio de las posiciones de altavoces cuando la herramienta está en funcionamiento no es posible. Esto es porque el cambio de ubicaciones de altavoces durante la reproducción no es una característica deseable (ni común). Por otra parte, manteniendo las ubicaciones de altavoces sin cambios reducimos el coste computacional, ya que la herramienta no necesita para comprobar los cambios de posición.

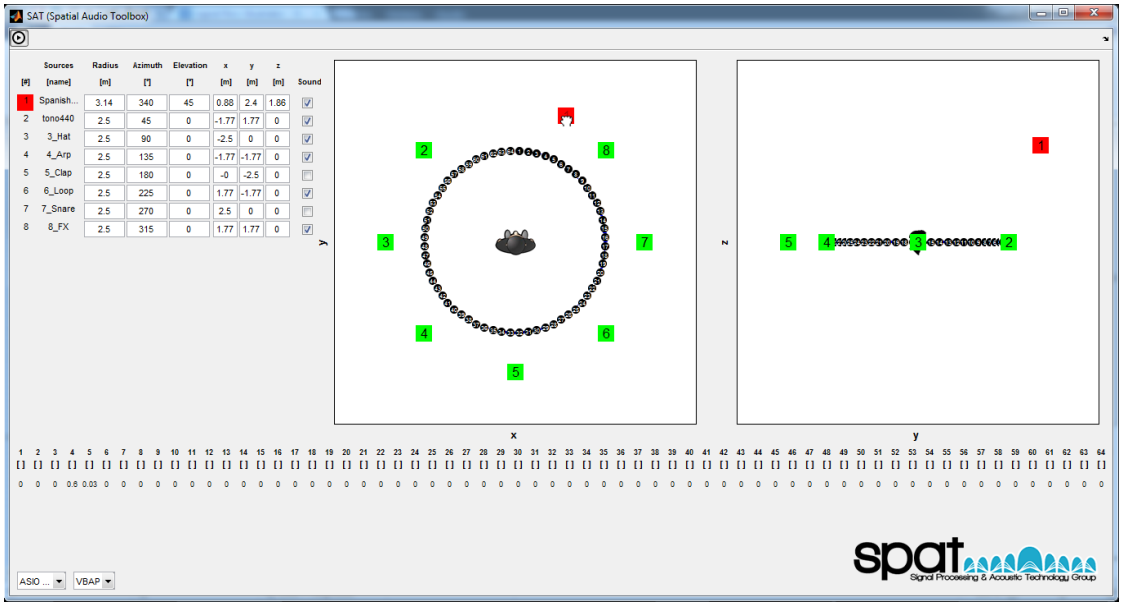



Figura 4. Captura de pantalla de la herramienta.

Las fuentes virtuales están representadas por cuadrados verdes marcadas con su índice de fuente del sonido correspondiente. Cuando el puntero del ratón está en contacto con cualquiera de las fuentes, toma la forma de una mano abierta, y cambia a una mano cerrada cuando se hace clic, cambiando el color de la fuente a rojo. Entonces, el usuario puede arrastrar el ratón mientras mantiene presionado el botón para mover la fuente. El color cambia de nuevo a verde cuando se suelta el botón del ratón.

Para iniciar la reproducción de sonido de la escena, el usuario sólo tiene que pulsar el botón de reproducción situado en la barra de tareas. El audio continuará reproduciéndose a menos que el usuario pulsa de nuevo el mismo botón. Hay que tener en cuenta que el método de representación y el controlador de audio seleccionado no se pueden modificar mientras la reproducción está encendida. Además, se proporciona un botón de verificación para cada fuente para permitir al usuario especificar cuáles de las fuentes de sonido deben ser reproducidas en cualquier momento (incluso durante la reproducción).

Una cuestión muy importante es que los parámetros de representación relacionada con cada fuente sólo se actualizan cuando sea necesario (cuando hay cualquier cambio en la ubicación de origen). Como resultado, se obtiene un gran ahorro computacional.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha presentado una herramienta de reproducción de audio espacial basada en MATLAB. La herramienta ha sido desarrollada mediante el uso de una interfaz gráfica de usuario programática y funcionalidades POO de MATLAB. La motivación para el desarrollo de esta herramienta reside en el hecho de que el uso de MATLAB está muy extendido en la comunidad de investigación y ofrece una plataforma independiente que permite que la herramienta se ejecute bajo diferentes sistemas operativos. Los algoritmos de renderizado utilizados por la herramienta presentada son independientes de la interfaz gráfica de usuario y los procesos de streaming de audio subyacentes, lo que permite a los investigadores y profesionales de la educación centrarse en los aspectos de procesado de señales en lugar de en la interacción de datos de usuario o la gestión de los controladores de audio. Actualmente, la herramienta implementa algoritmos básicos de representación como representación binaural, VBAP y AAP.

La estructura de la herramienta permite a un usuario inexperto incorporar nuevas funcionalidades sin mucho esfuerzo. Además, la estructura independiente entre los diferentes elementos en el sistema, hace que sea muy fácil modificar imágenes, archivos de audio, dimensiones gráficas, etc.

Actualmente, la herramienta está todavía en desarrollo, con especial atención a la aplicación de métodos Wave Field Synthesis (WFS) o Higher Order Ambisonics (HOA). Por otra parte, se pretende adaptar el código para leer archivos para la configuración de la escena de audio siguiendo XML Audio Scene Description Format (ASDF) de forma similar al SoundScape Renderer [7].

## 6. REFERENCIAS

1. **Pulkki, V.** (1997). Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. Journal of the AES, 45(6), 456-466.
2. **Spors, S., Rabenstein, R., and Ahrens, J.** (2008, May). The theory of wave field synthesis revisited. In 124th AES Convention, Amsterdam, The Netherlands (pp. 17-20).
3. **Gerzon, M. A**. (1985). Ambisonics in multichannel broadcasting and video. Journal of the AES, 33(11), 859-871.
4. **Puckette, M.** (1996). Pure Data: another integrated computer music environment. Proceedings of the Second Intercollege Computer Music Concerts, 37-41.
5. **Puckette, M. S., Ucsd, M. S. P., and Apel, T.** (1998). Real-time audio analysis tools for Pd and MSP.
6. **McCartney, J.** (2002). Rethinking the computer music language: SuperCollider. Computer Music Journal, 26(4), 61-68.
7. **Ahrens, J., Geier, M., and Spors, S.** (2008, May). The SoundScape Renderer: A Unified Spatial Audio Reproduction Framework for Arbitrary Rendering Methods. In 124th AES Convention, Amsterdam, The Netherlands.
8. Steinberg, ASIO. http://www.steinberg.net/nc/en/company/developers/sdk_download_portal.html
9. Mathworks. DSP System Toolbox. http://mathworks.com/help/dsp/
10. **Ahrens, J., and Spors, S.** (2007, October). Rendering of Virtual Sound Sources with Arbitrary Directivity in Higher Order Ambisonics. In 123th AES Convention, New York, USA.
11. **Bucanek, J.** (2009). Model-View-Controller Pattern. Learn Objective-C for Java Developers, 353-402.

12. **Cheng, C. I., and Wake_eld, G. H.** (1999, September). Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency, and Space. In 107th AES Convention, New York, USA.
13. **Neukom, M.** (2007, October). Ambisonic Panning. In 123th AES Convention, New York, USA.
14. **Gardner, B., and Martin, K.** (1994). HRFT Measurements of a KEMAR Dummy-head Microphone.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SIMULADOR DE REDES DE SENSORES ACÚSTICOS PARA APLICACIONES DE CONTROL DE CAMPO SONORO

REFERENCIA PACS: 43.60.Qv

Antoñanzas, Christian; Estreder, Juan; Ferrer, Miguel; Gonzalez, Alberto
Inst. de Telecom. y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), Univ. Politécnica de Valéncia (UPV), Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, Tel:+34963877007, ext. 73008, Fax:+34963877309, chanma@iteam.upv.es

**ABSTRACT**
In this work, a tool implemented in MATLAB to develop sound field control applications using acoustic sensor networks is proposed. This tool allows define acoustic nodes, that is, devices capable of obtaining information of the sound field from one or more sensors, capable of processing that information and modifying the sound field via one or more actuators. Moreover, it should possess the ability to communicate with other network nodes. The tool simulates the data acquisition and generation performed in real-time applications, the distributed processing and the exchanging information among the nodes allowing us to model the existing communication problems between the network and the nodes.

**RESUMEN**
En este trabajo se describe una herramienta implementada en MATLAB para desarrollar aplicaciones de control de campo sonoro usando redes de sensores acústicos. Dicha herramienta permite definir nodos acústicos, es decir, dispositivos capaces de obtener información del campo sonoro mediante uno o varios sensores, procesarla, y modificar dicho campo sonoro mediante uno o varios actuadores, además de comunicarse con otros nodos. La herramienta simula la adquisición y generación de datos en tiempo real, el procesado distribuido y el intercambio de información entre nodos permitiendo modelar los problemas existentes en dicho intercambio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas de sensores acústicas (Wireless Acoustic Sensor Networks, WASN) están consideradas con una solución barata, flexible y eficiente para diferentes aplicaciones acústicas [1], [2]. En estas aplicaciones, los nodos acústicos están compuestos normalmente por micrófonos conectados a un procesador, con algún tipo de capacidad computacional y comunicativa. Existen numerosas aplicaciones para este tipo de nodo acústico [3] pero la mayoría se suelen centrar en la estimación de una señal o un parámetro que puede ser medido por todos los nodos y no interactúan con el medio, es decir, no generan señales. Para aplicaciones de control de campo sonoro, como control activo de ruido o cancelación de crosstalk, estos nodos deben tener la capacidad de actuar sobre el entorno emitiendo sonidos a través de actuadores o altavoces. Además, la red debiera centrarse en el diseño de señales que alimente a los altavoces y por tanto, controlen el campo sonoro. Por lo tanto, definimos nodo acústico como un dispositivo capaz de obtener información de uno o más sensores (micrófonos) y capaz de generar señales vía uno o más actuadores (altavoces) para controlar el campo sonoro. Además, debe tener la habilidad de comunicarse con otros nodos de la red. Smartphones, tablets o portátiles son algunos ejemplos de nodos acústicos.

Basado en esto, en este trabajo se presenta una herramienta para modelar y simular sistemas de control de sonido así como su comportamiento. Es importante diferenciar tres procesos en estos sistemas (Figura 1) para entender el funcionamiento de la herramienta:

1) Algoritmos: definen las operaciones a ejecutar entre las señales del sistema y su interacción con los dispositivos de entrada/salida (micrófonos/altavoces) así como con otros elementos de la red.
2) Sistema de comunicación: permite el intercambio de información entre los nodos y permite simular los problemas reales en las comunicaciones como latencias, errores de transmisión, pérdida de información,…
3) Sistema acústico: simula la propagación por un medio acústico de las señales emitidas por los altavoces de los nodos acústicos hasta que son recogidas por los micrófonos de los mismos. Para ello, se vale de las respuestas al impulso que caracterizan los caminos acústicos (generalmente medidos en un recinto que se quiere recrear o sintetizados para simular espacios virtuales) y que enlazan los diferentes altavoces con cada uno de los micrófonos del sistema.

A pesar de que pueden intercambiar información, los tres procesos trabajan de manera independiente. Este concepto es importante para entender cómo funciona la herramienta de simulación.

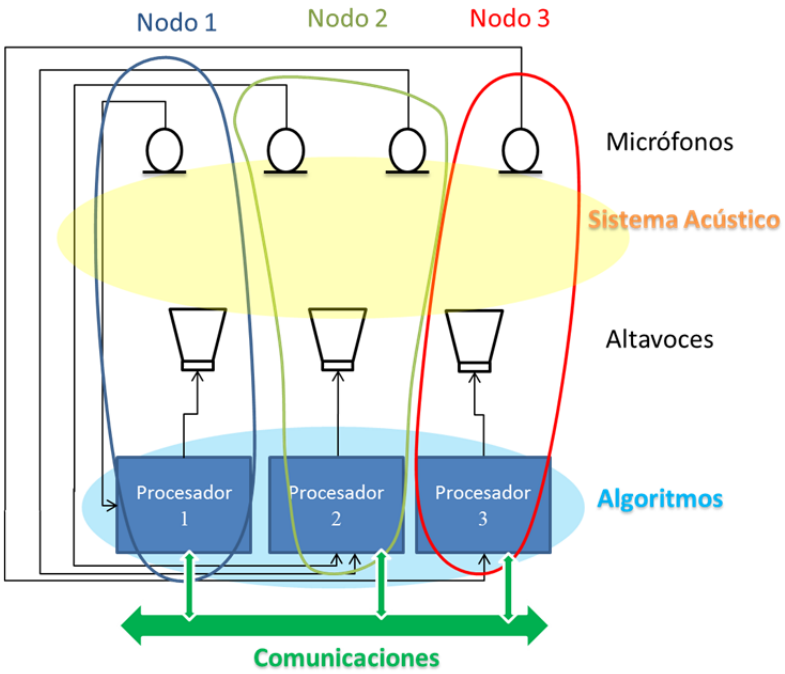



**Figura 1:** Esquema de sistema de control sonoro con nodos multicanal

El simulador acústico es una herramienta implementada en MATLAB que permite desarrollar aplicaciones de control de campo sonoro destinadas a implementarse en WASN, sin necesidad de disponer físicamente de los nodos acústicos, sino definiendo solamente sus características y los algoritmos que ejecutaría cada uno de ellos, caracterizando a su vez, la red de comunicaciones que emplearían los nodos en la transferencia de información y el sistema acústico (recinto o sala) en el que los nodos estarían ubicados.

El principal objetivo de esta herramienta es poder desarrollar y simular algoritmos de procesado de audio multicanal destinados a ser ejecutados en DSP o cualquier otro sistema de adquisición y generación de datos en tiempo real, así como poder analizar el comportamiento de los mismos, siendo una de las principales características del simulador que cada nodo puede usar procesado de señal distribuido si la red de comunicaciones lo permite. Este procesado tiene como objetivo obtener una señal de salida en cada nodo como resultado de procesar una serie de señales propias en cada nodo junto con cierta información compartida proveniente de otros nodos de la red. Cada nodo procesa las señales independientemente y cada uno es relevante para el funcionamiento global del sistema de acuerdo con la aplicación deseada. Además, la herramienta puede simular los problemas existentes en las comunicaciones entre red y nodos así como una adquisición de datos no ideal y muy próxima a la realizada en aplicaciones en tiempo real.

El simulador presenta otras virtudes como el almacenamiento, reproducción y análisis de todas las señales de audio o parámetros de la simulación así como herramientas para la definición, modificación o estudio del sistema acústico. Por lo tanto, la herramienta permite el paso entre la idea matemática inicial de cada algoritmo y su programación final sobre plataformas digitales. A continuación, se presenta la descripción del funcionamiento del simulador.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

### 2.1 ¿Cómo está formado el Simulador?

El simulador está basado en un tipo de dato de MATLAB llamado estructura (struct). Una estructura es un conjunto de datos organizado por grupos llamados campos. Cada campo puede contener cualquier tipo de dato con cualquier tamaño.

Se puede construir estructuras de dos maneras:

- Mediante la función struct donde los argumentos de entrada son los nombres de los campos y sus respectivos valores.
  Ejemplo: structArray = struct('campo1',valor1,'campo2',valor2,...)
- Mediante asignación creando los distintos campos uno a uno y estableciendo un valor específico para cada uno.
  Ejemplo: (structArray.campo1='valor1'; structArray.campo2=valor2,...)

El acceso a datos se realiza mediante el operador punto seguido del nombre del campo al que queramos acceder (ej: structNombre.campoNombre*).*

Es posible crear arrays de estructuras pero todas deben tener el mismo número de campos. A su vez, todos los campos de los mismas deben compartir el mismo nombre aunque pueden contener diferente tipo y tamaño de datos. Además, una estructura permite mecanismos de almacenamiento jerárquico para contener diferentes tipos de datos. Se permiten estructuras anidadas y crear vectores o matrices de estructuras. También, es posible añadir nuevos campos a una estructura en cualquier momento. Además, existen funciones optimizadas para realizar operaciones específicas [4].

### 2.2 Descripción del Modelo

En esta sección se describen los diferentes pasos para realizar la simulación de un modelo de red acústica definido como el modelo basado en la configuración de todos los parámetros necesarios para simular una aplicación de control de campo sonoro.

El primer paso es inicializar el modelo. Para esto, es necesario configurar todos los procesos del sistema:

- Configuración del sistema acústico: Se carga el archivo que contiene la respuesta al impulso del canal acústico entre cada altavoz y cada micrófono situados en el recinto que se va a simular o sintetizar. En esta parte, se define el número de altavoces y micrófonos que gestionará cada nodo. Es posible crear nodos multicanal formados por un número arbitrario de altavoces y micrófonos.
- Configuración de los algoritmos: El algoritmo a ejecutar por cada nodo se elige en función de la aplicación a simular. Además, se definen los diferentes parámetros necesarios para el funcionamiento de cada algoritmo. Por lo tanto, varios nodos pueden compartir el mismo algoritmo, pero pueden tener diferentes parámetros de configuración.
- Configuración del sistema de comunicaciones: Se define qué tipo de topología tiene la red de comunicaciones. Esto explica como colaboran los nodos. Por ejemplo, un nodo puede intercambiar información con un pequeño grupo de nodos o sólo con sus nodos vecinos. Por otra parte, la red de comunicaciones puede introducir latencias en la transmisión de información a los nodos por lo que es posible simular este retardo jugando con el número de muestras en la recepción o transmisión de datos de cada nodo.
- Configuración del sistema de adquisición de datos: La herramienta intenta simular la adquisición de datos realizada en aplicaciones en tiempo real a través de redes asíncronas. Cada nodo tiene su propio reloj de muestreo y almacena, procesa y envía los datos de forma independiente al resto de nodos. Intentando similar el comportamiento de un DSP, los nodos están en un estado permanente de bajo consumo hasta que se produzca una interrupción debido a la llegada de datos. En ese momento, el nodo realiza el procesado correspondiente. Tal procesado termina con otra interrupción para volver al estado inicial de bajo consumo del nodo. Así, definimos dos flags de interrupción: lectura/escritura (R/W) y el tiempo de procesado. La interrupción R/W indica el instante de tiempo en el que el nodo puede leer los nuevos datos procedentes de sus micrófonos y puede escribir los datos procesados en la iteración anterior para ser reproducida por los altavoces. El tiempo de procesado indica el tiempo que se necesita para procesar un bloque de muestras. Si el nodo puede leer nuevos datos (interrupción R/W activa), pero el nodo aún está procesando datos anteriores (interrupción tiempo de procesamiento activa también), no se adquirirán ni procesarán datos nuevos. El tiempo de muestras será la unidad mínima de tiempo a la que el simulador funciona. Así, el sistema acústico trabaja muestra a muestra en el dominio del tiempo (para aproximarnos lo más posible al dominio continuo), pero al mismo tiempo, los nodos pueden ejecutar algoritmos implementados por bloques de muestras (en el dominio del tiempo o de la frecuencia). Del mismo modo, la red de comunicaciones trabaja muestra a muestra independientemente de los otros procesos. En resumen, al mismo tiempo cada nodo puede funcionar con un bloque de tamaño diferente, una frecuencia de muestreo diferente y un tiempo de procesado diferente.

A partir de todos los datos de configuración, se crea la estructura de la red y se caracteriza el modelo de red acústica. En resumen, en esta primera parte, se definen todos los datos necesarios para crear una estructura de red en función de la aplicación a simular.
La estructura de la red direcciona la información pero no la procesa. Por lo tanto, la estructura debe tener campos importantes que contengan las variables que van a utilizar los algoritmos, el sistema acústico y el sistema de comunicación para el procesado de datos.
Algunos de estos campos son:

- Estado: Campo que contiene las variables de entrada y de salida de cada proceso en el sistema.
- Estado inicial: Campo que contiene los valores iniciales de las variables del campo anterior.
- Histórico: Campo para almacenar las variables que desea analizar.

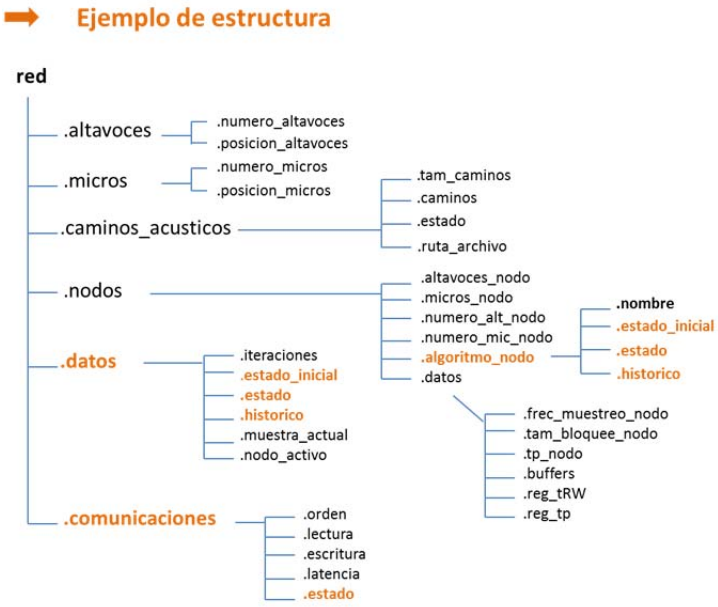



**Figura 2:** Ejemplo del tipo de estructura usada en el simulador.
Los campos importantes para el funcionamiento de la herramienta están marcados en naranja.

El siguiente paso es realizar la simulación. La herramienta ejecuta los algoritmos en cada nodo y simula si hay latencias en las comunicaciones y/o intercambio de información entre los nodos. Una vez las señales han sido procesadas por los algoritmos y se han enviado a los altavoces, el sistema acústico transforma las señales reproducidas por los altavoces que a su vez son captadas por los micrófonos.

Por tanto, solamente modificando ciertos parámetros de la configuración, se pueden realizar rápidamente diferentes simulaciones para diferentes aplicaciones.

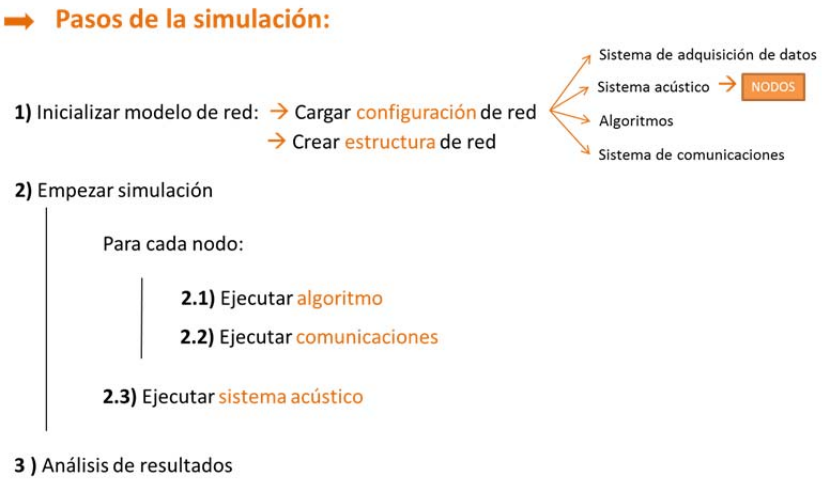



**Figura 3:** Pasos para realizar la simulación de un modelo de red acústica

### 2.3 Simulación de los Algoritmos

Cada nodo puede ejecutar cualquier algoritmo compatible con el código de direccionamiento de la herramienta. Los algoritmos pueden trabajar muestra a muestra o por bloques de muestras.

La idea es adaptar el código del algoritmo al formato definido por la estructura para hacer más flexible la herramienta sin importar el tipo de algoritmo. El algoritmo lee valores en ciertos campos de la estructura, ejecuta las operaciones pertinentes y escribe en determinados campos de la estructura.
La definición del algoritmo consta de cuatro partes:

1) Declaración: Se declara un nombre para la función que acepta entradas de la estructura y devuelve las salidas a la estructura.
2) Lectura: El proceso de lectura se lleva a cabo en el campo estado del algoritmo y en el campo estado del sistema de comunicaciones (si existe cualquier intercambio de información entre los nodos), donde se encuentran las variables necesarias para el funcionamiento del algoritmo.
3) Procesado: En esta sección, se ejecutan las operaciones necesarias para la correcta ejecución del algoritmo. Dependiendo del tipo, el algoritmo puede procesar una o varias variables de entrada (correspondientes a las señales de entrada o a las señales captadas por los micrófonos o a parámetros enviados por otros nodos, etc...) y uno o varias variables de salida (correspondientes a las señales que los altavoces tienen que reproducir o a parámetros que necesitan otros nodos, etc...).
4) Escritura: Después del procesado y de manera similar al proceso de lectura, los nuevos valores de las variables deben almacenarse en el campo estado tanto del algoritmo de cada nodo como de la red de comunicaciones.

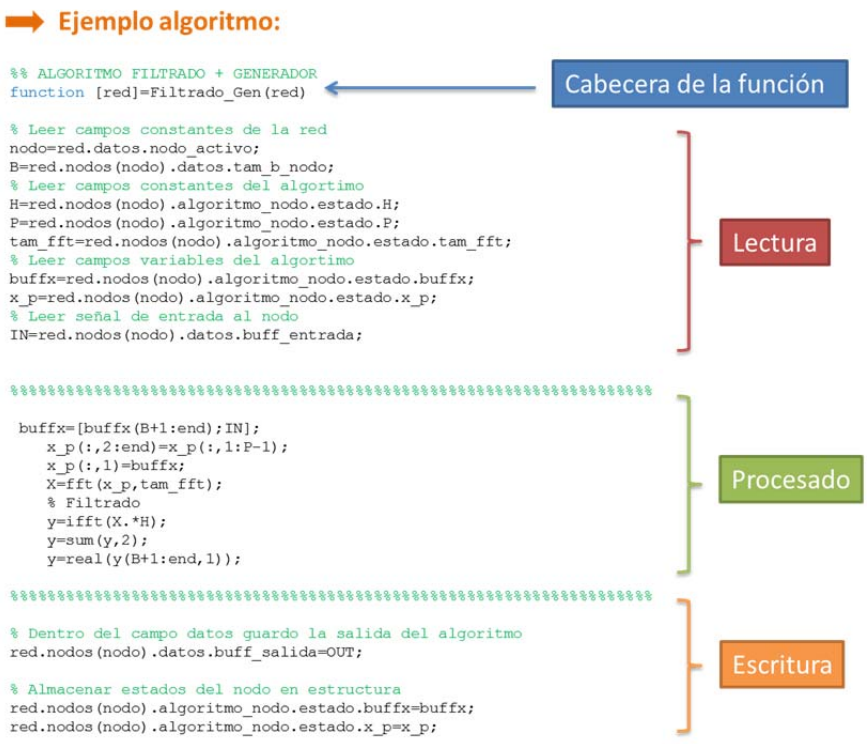



**Figura 4**: Ejemplo de función que modela un algoritmo

### 2.4 Simulación del Sistema de Comunicaciones

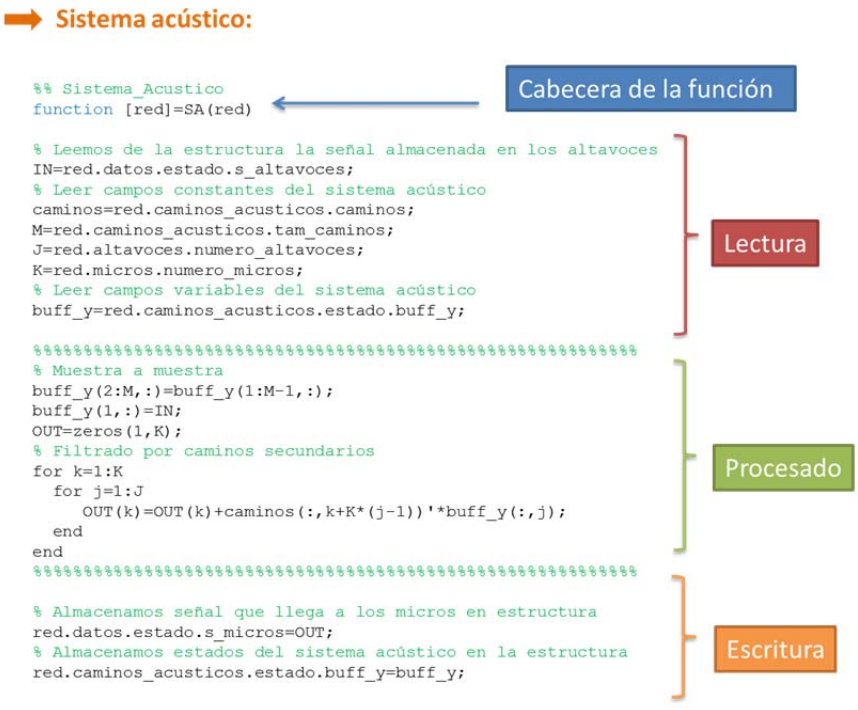
El sistema de comunicación realiza dos tipos de operaciones en el simulador. Por un lado, y como se mencionó anteriormente, es posible simular las latencias (u otros efectos) en la transmisión de información a los nodos retrasando las señales de entrada un cierto número de muestras en cada nodo respectivamente. Por otro lado, si se utilizan algoritmos de colaboración, el sistema permite el intercambio de información entre los nodos. En este caso, la topología de la red explica cómo deben colaborar los nodos. Es decir, para cada nodo, de qué otros nodos puede leer datos y en cuáles otros nodos puede escribir datos.

Esta información, junto con los nodos que colaboran y su orden en la red, debe ser introducida en la configuración de la red de comunicaciones. Luego, cada nodo lee y escribe datos en el ámbito estatal en la red de comunicaciones. Por lo tanto, dependiendo de la topología, la red será responsable de enviar esa información al nodo correspondiente así como de introducir errores o retardos, en su caso.

### 2.5 Simulación del Sistema Acústico

El sistema acústico está formado por un número de actuadores (altavoces) y un número de sensores (micrófonos), junto con las respuestas al impulso de los caminos acústicos entre ellos. Por lo tanto, el sistema acústico caracteriza un recinto y la posición donde están situados los altavoces y micrófonos dentro de él.

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema acústico debe trabajar muestra a muestra en el dominio del tiempo. La forma de programarlo es idéntica a la definición de los algoritmos. En primer lugar, la declaración de la función seguida por una parte en la que se leen las variables necesarias a partir de los campos de la estructura. A continuación, la parte de procesado donde las señales reproducidas por los altavoces son filtradas por los caminos acústicos. Finalmente, en la parte de escritura, las señales captadas por los micrófonos se almacenan en la estructura.




```
%% Sistema_Acustico
function [red]=SA(red)

% Leemos de la estructura la señal almacenada en los altavoces
IN=red.datos.estado.s_altavoces;
% Leer campos constantes del sistema acústico
caminos=red.caminos_acusticos.caminos;
M=red.caminos_acusticos.tam_caminos;
J=red.altavoces.numero_altavoces;
K=red.micros.numero_micros;
% Leer campos variables del sistema acústico
buff_y=red.caminos_acusticos.estado.buff_y;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Muestra a muestra
buff_y(2:M,:)=buff_y(1:M-1,:);
buff_y(1,:)=IN;
OUT=zeros(1,K);
% Filtrado por caminos secundarios
for k=1:K
  for j=1:J
     OUT(k)=OUT(k)+caminos(:,k+K*(j-1))'*buff_y(:,j);
  end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Almacenamos señal que llega a los micros en estructura
red.datos.estado.s_micros=OUT;
% Almacenamos estados del sistema acústico en la estructura
red.caminos_acusticos.estado.buff_y=buff_y;
```

**Figura 5:** Función que modela el sistema acústico

### 2.6 Análisis de Resultados

La herramienta nos permite analizar cualquier señal o parámetro existente en el sistema. Usando una función específica, la herramienta almacena en la estructura sólo aquellas señales captadas por los micrófonos o reproducidas por los altavoces seleccionados previamente. Esto reduce la carga computacional y la memoria almacenada, sobre todo en el caso de sistemas multicanal con un gran número de micrófonos o altavoces donde sólo algunas señales capturadas o reproducidas son necesarias.

### 2.7 Limitaciones

La principal limitación es la falta de interacción entre el usuario y la herramienta. Por lo tanto, la implementación de una interfaz gráfica de usuario es necesaria. Esto mejoraría, sobre todo, la capacidad de análisis de los resultados. Para trabajar con frecuencias de muestreo retardadas que no son múltiplo de la unidad mínima de tiempo, es necesario crear una unidad de tiempo inferior a la muestra. Desde el punto de vista de la programación en Matlab, se ha tratado de vectorizar nuestro código. A pesar de esto, el uso de bucles es inevitable. Por lo que, cuando se utiliza un gran número de nodos, tanto el tiempo de ejecución como el almacenamiento en memoria son considerables. Además, trabajar con diferentes unidades de tiempo aumenta el tiempo de ejecución. Actualmente no se ha implementado ninguna simulación con una resolución numérica diferente de las proporcionadas por Matlab ya que no se han simulado los efectos de la precisión finita. Tampoco se ha simulado el efecto de la cuantificación en los Conversores AD/DA en la entrada y salida de audio, por la que no se han tenido en cuenta efectos tales como la saturación y los errores de cuantificación. Y, por último, la herramienta no es compatible con sistemas acústicos dinámicos o variables.
Todas estas limitaciones son las presentes en la versión actual de la herramienta presentada y actualmente son líneas de desarrollo futuro para su mejora.

## 3. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una herramienta de simulación que permite el desarrollo de aplicaciones de control de campo sonoro en redes distribuidas cuya principal ventaja es la facilidad y rapidez para simular diferentes sistemas.
La herramienta permite crear nodos con un número arbitrario de micros y de altavoces además de poder ejecutar cualquier algoritmo tanto en el dominio del tiempo, trabajando muestra a muestra, como algoritmos que trabajan por bloques, independientes del tamaño del bloque y trabajando en el dominio del tiempo o de la frecuencia. El simulador ejecuta el sistema acústico muestra a muestra de forma independiente y permite modelar tanto el comportamiento del sistema de comunicaciones simulando los posibles problemas existentes, como la adquisición de datos realizada en aplicaciones en tiempo real. Por último, la herramienta propuesta permite analizar cualquier señal o parámetro existente en el sistema acústico, en los nodos o en la red de comunicaciones, es decir, en cualquier punto del sistema.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. Communications Magazine, IEEE, 40 (8) 102–114, 2002.
[2] D. Puccinelli and M. Haenggi: Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing. Circuits and Systems Magazine, IEEE, vol. 5, no. 3, pp. 19–31, 2005.
[3] A. Bertrand: Applications and trends in wireless acoustic sensor networks: A signal processing perspective. Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2011 18th IEEE Symposium on, pp.1–6, 2011.
[4] MathWorks help, on line at:
*http://es.mathworks.com/help/matlab/ref/struct.html?s_cid=srchtitle*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# GESTOR DE APLICACIONES DE PROCESADO DE SONIDO SOBRE ANDROID PARA LA CREACIÓN DE REDES DE NODOS ACÚSTICOS CON DISPOSITIVOS COMERCIALES

PACS: 43.60.Dh.

Estreder, Juan; Antoñanzas, Christian; Piñero, Gema; De Diego, María
Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n; Edificio 8G
46022 Valencia (España)
Tel.: +34 963 879 761
E-mail: juaescam@iteam.upv.es, chanma@iteam.upv.es

## ABSTRACT

This article describes the development of an application on Android able to manage Wi-Fi connections between mobile devices (smartphones and tablets) and Bluetooth connections between each device and a wireless speaker. In this way it is possible to create a network of two or more acoustic nodes using commercial devices, avoiding the design of ad-hoc acoustic nodes. The ability to use speakers connected via Bluetooth gives a great versatility to the network deployment and offers better performance in applications that need good quality of the reproduced sound as transaural reproduction or generalized cross-talk cancellation.

## RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo de una aplicación sobre Android capaz de gestionar conexiones Wi-Fi entre dispositivos comerciales (Smartphone o Tablet) y conexiones Bluetooth entre cada dispositivo y un altavoz inalámbrico. De esta forma se consigue crear una red de dos o más nodos acústicos con dispositivos comerciales sin necesidad de diseñar un nodo ad-hoc. El hecho de poder usar altavoces inalámbricos (mediante conexión Bluetooth) permite gran versatilidad en el despliegue de la red y mejor rendimiento en aplicaciones de campo sonoro como son la reproducción transaural o la cancelación generalizada de cross-talk.

## INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks*, WSN) son una solución barata, flexible y eficiente para la vigilancia del medio ambiente y el hábitat, así como para el seguimiento y mantenimiento de equipos industriales [Akyildiz2002, Martinez2004, Puccinelli2005] entre otras tareas. Ellas han sido objeto de investigación desde hace más de

diez años, aunque su uso comercial no está tan extendido como se esperaba. Desde sus inicios las redes de sensores han sido también usadas en aplicaciones acústicas [Maroti2004, Chen2004], dando lugar a lo que se denomina redes de sensores acústicos inalámbricos (*Wireless Acoustic Sensor Networks*, WASN), cuya característica particular con respecto a una WSN es que utilizan micrófonos, o cualquier otro tipo de sensor acústico. En una WASN, el nodo consiste en uno o más micrófonos conectados a un procesador con algún tipo de comunicación y con capacidad de procesado. Las aplicaciones que hacen uso de este tipo de nodos acústicos son numerosas, ver [Bertrand2001, Bertrand2015] y sus referencias. En general, las WASN se centran en la estimación de una señal o parámetro común que es medido por todos los nodos, o en la estimación de señales específicas de cada nodo que comparten algunas propiedades o parámetros comunes con el resto. Otra característica típica de este tipo de nodos tiene que ver con su electrónica, que además de dedicarse a la grabación del sonido y a tareas de control y comunicación, normalmente también puede ejecutar algoritmos de procesamiento de señal.

Sin embargo, si se tienen en cuenta aplicaciones de control y reproducción de campo sonoro, entonces las WASN deben estar compuestas por nodos capaces de emitir sonidos a través de un altavoz o actuador. Por otra parte, la red no sólo debe hacer tareas de estimación, sino que también tiene que generar las señales adecuadas que alimentarán los altavoces y controlarán el campo sonoro [Ferrer2015]. En este sentido, a lo largo de este artículo consideraremos un nodo acústico genérico como una unidad de procesado que puede grabar y reproducir señales sonoras, procesarlas y comunicarse con otros nodos para intercambiar información local y estado de la red. Por tanto, una WASN no solo monitoriza su propio entorno sonoro, sino que también es capaz de modificarlo.

Desde un punto de vista práctico, una WASN podría implementarse utilizando *smartphones* o tabletas como nodos acústicos. En general este tipo de dispositivos tienen uno o dos micrófonos, un altavoz, y sus procesadores exhiben una potencia similar a los de los ordenadores portátiles (incluso mejor en muchos modelos recientes). También pueden comunicarse con otros dispositivos a través de conexiones inalámbricas Wi-Fi IEEE 802.11 o Bluetooth. En este sentido, el número de aplicaciones de procesamiento de sonido en dispositivos móviles ha ido en aumento durante los últimos años. La mayoría de ellas están pensadas para el entretenimiento, pero no sólo. Algunos ejemplos recientes son [Kim2014], donde varios dispositivos móviles reproducen el mismo sonido simultáneamente con el fin de proporcionar una experiencia de sonido envolvente como si estuvieran dentro de un teatro, y [Kardous2014], en el que se examina el rendimiento de una amplia gama de aplicaciones móviles capaces de medir el nivel de presión sonora emulando un sonómetro.

En este artículo se explican los procedimientos necesarios para el desarrollo de una WASN implementada sobre Android con capacidad de gestionar conexiones Wi-Fi entre varios dispositivos y conexiones Bluetooth entre cada dispositivo y un altavoz inalámbrico. El hecho de poder usar altavoces inalámbricos (mediante conexión Bluetooth) permite gran versatilidad en el despliegue de la red y mejor rendimiento en aplicaciones de control de campo sonoro debido a la mejor respuesta en frecuencia de dichos altavoces respecto a los embebidos. A lo largo del artículo se desarrollarán los pasos necesarios para gestionar y realizar las conexiones Wi-Fi y Bluetooth de los dispositivos. Se tendrá en cuenta la sincronización y se explicará también como realizar el procedimiento para estimar los canales acústicos de la WASN.

En este punto conviene establecer el contexto en el que se lleva a cabo este desarrollo:

1. Para la programación en Android (Java), se ha hecho uso del entorno *Eclipse* [eclipse].

2. Aunque este desarrollo está pensado para una red con varios nodos, por sencillez y comodidad se ha desarrollado en una primera etapa para dos nodos. Cada nodo dispone de su propio micrófono y está conectado a un altavoz inalámbrico.

3. La conexión entre dispositivos móviles se realiza mediante Wi-Fi y la conexión entre un dispositivo móvil y su altavoz mediante Bluetooth. La WASN resultante se muestra en la Figura 1. En ella se señalan también las señales grabadas, $x_i(n)$, reproducidas, $s_i(n)$, y los caminos acústicos correspondientes, $\mathbf{c}_{ij}$.

4. La conexión Wi-Fi se realiza con el protocolo TCP en el puerto 6555. Por otra parte, la conexión Bluetooth utiliza el perfil A2DP [A2DP2012] que es el que define la transmisión de un *stream* de audio a través de la conexión establecida.

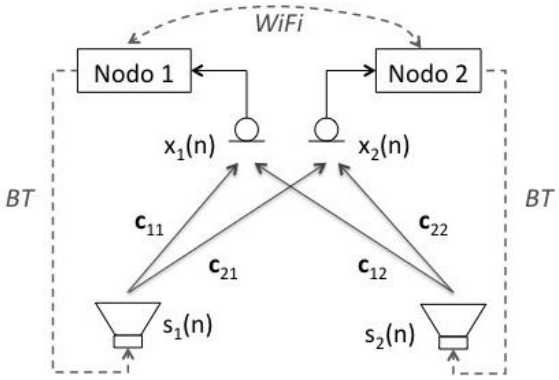



Fig. 1. Conexiones de una WASN con dos nodos mediante Wi-Fi y Bluetooth.

El resto de secciones están organizadas de esta forma: En la sección 2 se explican los procedimientos para gestionar las conexiones inalámbricas de los dispositivos entre sí y con sus respectivos altavoces. La sección 3 explica los procedimientos básicos necesarios para la estimación de los distintos canales acústicos y para el cálculo del retardo inherente a la conexión Bluetooth de los altavoces, mientras que la sección 4 trata de procedimientos de ajuste en la sincronización de los dispositivos a la hora de emitir sonidos. Por último, la sección 5 recoge las conclusiones más relevantes de este trabajo.

## GESTIÓN DE LAS CONEXIONES

### 2.1 Conexión Wi-Fi

Como ya se ha comentado anteriormente, la conexión se establece mediante el protocolo TCP. Para gestionarla se usa la librería ***java.net***, la cual posee las clases[1] ***ServerSocket*** y ***Socket***. En primer lugar se establecen los siguientes roles: un dispositivo deberá actuar como servidor y el otro como cliente. Los roles son necesarios únicamente durante el proceso de conexión, una vez establecida dicha conexión ambos dispositivos tendrán los mismos atributos a la hora de enviar y recibir información.

[1] Es una plantilla implementada en software que describe un conjunto de objetos con atributos (variables) y comportamiento similares.

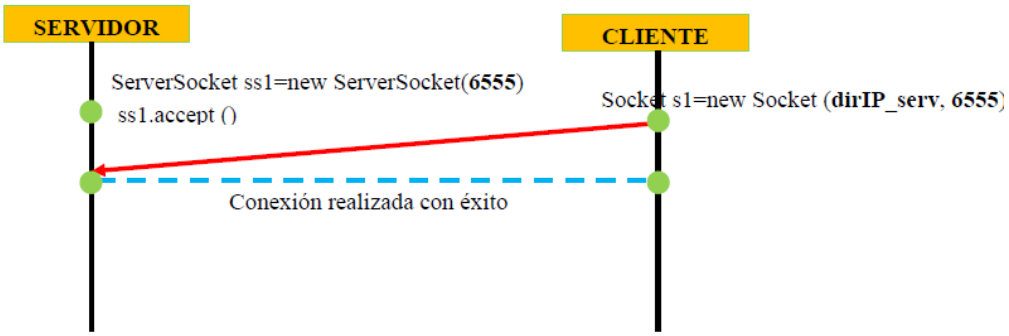



Fig. 2. Proceso de conexión cliente-servidor en Wi-Fi.

La Figura 2 muestra el proceso de conexión. Se definen dos dispositivos (**A** y **B**), donde **A** actúa como servidor y **B** como cliente. El dispositivo **A** tendrá que usar el método ***accept()*** de la clase ***ServerSocket*** para habilitar la escucha de peticiones de conexión por parte del cliente. Este método es bloqueante, lo que significa que hasta que no se haya establecido una conexión no se ejecutará la siguiente línea de código. Por otra parte el dispositivo **B** realizará la petición de conexión mediante la clase ***Socket*** y el método que usa también es bloqueante.

Como se puede observar en la Figura 2, se conectan a un puerto cuya elección la realiza el programador sin restricciones de ningún tipo, puede ser cualquier puerto libre. Una vez realizada la conexión, los dos dispositivos podrán comunicarse y enviarse información de forma bidireccional.

### 2.2 Conexión Bluetooth

La conexión Bluetooth es más sencilla que la anterior ya que solo se programa un dispositivo. Para la conexión se utiliza el perfil A2DP [A2DP2012] de Bluetooth, concretamente el método ***connect()*** de la clase ***BluetoothA2dp***, el cual se encuentra en la librería ***android.bluetooth***. Este método se tiene que llamar de manera especial (en Java se denomina **Reflection**) ya que el método no se muestra en el API, pero aparece en el código fuente de la clase ***BluetoothA2dp***. Una vez invocado, la conexión Bluetooth queda establecida. El uso de este perfil consigue que el audio se reproduzca por el altavoz inalámbrico anulando la reproducción por los altavoces del propio dispositivo móvil.

Cabe aclarar que en Bluetooth antes de conectarse a un dispositivo hay que vincularse a él. Un dispositivo conectado siempre está vinculado[2], pero un dispositivo vinculado no tiene por qué estar conectado. Por lo tanto, si se quiere conectar un dispositivo que no esté vinculado previamente, la aplicación lo vincula de manera transparente al usuario.

### Procesado del sonido

En este apartado se describe el proceso de estimación de las distintas Respuestas al Impulso del Canal Acústico (RICA), es decir, la obtención de las $\mathbf{c}_{ij}$ i,j=1,2 de la Figura 1. También se describe el cálculo del retardo del canal asociado a la conexión Bluetooth, entendido como el tiempo que el sistema operativo tarda en reproducir un fichero de audio desde que el programa le ordena que lo reproduzca por el altavoz inalámbrico hasta que efectivamente lo hace. Este retardo depende del hardware y software utilizado. En pruebas preliminares para un sistema operativo Android 4.4 o superior, una versión de Bluetooth 2.1 o superior, y distintas marcas de

[2] La vinculación Bluetooth es un mecanismo de seguridad que sirve para restringir el acceso a usuarios autorizados.

altavoces, este retardo está entre los 150 y los 300 ms. Dado que cada RICA presentará un retardo Bluetooth distinto, y este es un dato ajeno al camino acústico en sí, la aplicación desarrollada utiliza el retardo Bluetooth de cada RICA para poder obtener una misma referencia temporal en todas ellas, tal y como se explica más adelante.

### 3.1 Cálculo del Retardo Bluetooth

Para calcular el retardo sufrido por el sistema la aplicación utiliza la correlación entre las señales reproducida y grabada. La señal a reproducir debe tener las mismas características que un ruido blanco en cuanto a su función de correlación. En nuestra aplicación hacemos uso de Secuencias de Máxima Longitud (*Maximum Length Sequences*, MLS) [Rife1989].

Se define la correlación como:

$$R_x(n_0) = \sum_{n=0}^{T-n_0} xrep(n+n_0)xrec(n) \qquad (1)$$

donde $n_0$ es el índice de la muestra temporal, *xrep* es la señal que reproduce el altavoz, *xrec* es la señal que se capta con el micrófono del dispositivo móvil y $T$ es la longitud de estas dos señales. Una vez calculada (1), se obtiene la posición del valor máximo de la correlación y a partir de ella se calcula el retardo en segundos como:

$$\tau = (\arg\{\max_{n_0}\{R_x(n_0)\}\}) \cdot T_s \qquad (2)$$

donde $T_s$ es el periodo de muestreo. La función "arg{max}" indica el índice de $n_0$ en el que está situado el máximo de $R_x$. Si se desea obtener el retardo en muestras, simplemente se calcularía (2) sin multiplicar por $T_s$. Los retardos así obtenidos se utilizarán en el siguiente apartado para estimar las RICAs de la WASN con una única referencia temporal. Téngase en cuenta que para cada canal acústico $\mathbf{c}_{ij}$ se calcula un retardo Bluetooth $\tau_{ij}$.

Respecto a la programación de este algoritmo en Android, hay que tener en cuenta que una de las limitaciones de este lenguaje es la pobre gestión de los arrays (vectores y matrices), ya que para realizar operaciones entre ellos hay que hacerlas componente a componente.

### 3.2 Cálculo de la Respuesta al Impulso del Canal Acústico (RICA)

El otro algoritmo de procesado de sonido incluido en la aplicación es la estimación de los coeficientes de los canales acústicos $\mathbf{c}_{ij}$. Esta estimación se realiza mediante un procedimiento de identificación de sistemas y hace uso del algoritmo adaptativo *Least Mean Squares* (LMS), tal y como se muestra en la Figura 3.

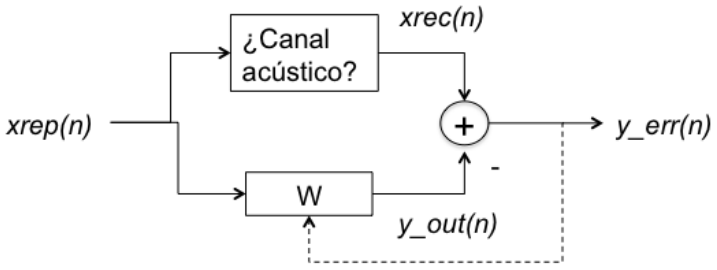



Fig. 3. Procedimiento usado para estimar la RICA mediante LMS.

El algoritmo en Android hace uso de las siguientes variables:

- Un array llamado *Buf_fA* de longitud L.
- Una variable llamada *y_out* de salida del filtro adaptativo W.
- Una variable llamada *y_err* que mide el error en cada iteración del algoritmo.
- Una variable llamada *mu* constante y de pequeño valor.
- Un array llamado *W* de longitud L que contiene los coeficientes de la RICA estimada en esa iteración.

A continuación se explica el procedimiento iterativo realizado sobre Android:

1. Se refresca la variable *Buf_fA* mediante:
   *>> Buf_fA(2:L)= Buf_fA(1:L-1)*
   *>> Buf_fA(1)=xrep(i)*
2. Se calcula *y_out* como:
   *>> y_out= w*Buf_fA*
3. A continuación se calcula:
   *>> y_err=xrec(i)-y_out*
4. Y por último se almacena la estimación del canal acústico en w:
   *>> w=w+Buf_fA*y_err*mu*

Estos cuatro pasos se realizan desde i=1:Lx, donde Lx es la longitud de las señales *xrec* y *xrep*, o la longitud mínima de ambas. Como se ha comentado anteriormente, las operaciones con arrays en Android se hacen componente a componente, por lo que dentro del bucle principal, hay otros dos más correspondientes a las instrucciones 2 y 4. Por último, en la instrucción 1 se copia un vector a otro y en este caso Android hace uso del método ***System.arraycopy*** que sí es un método eficiente.

Una vez calculados los canales acústicos $\mathbf{c}_{ij}$, la aplicación los recorta a partir de una misma referencia temporal para todos ellos, eliminando el retardo inherente a las conexiones Bluetooth. Sea $t_{min}$ el valor mínimo de todos los retardos $\tau_{ij}$. calculados mediante la ecuación (2). A partir de dicho valor mínimo la aplicación recorta todas las RICAs estimadas entre $t_{min} - L_p*T_s$ y $t_{min} + L_c*T_s$, siendo $L_p$ una longitud de guarda para no recortar componentes relevantes del canal, y $L_c$ la longitud de los canales acústicos. Nótese que el algoritmo de estimación usa una longitud L que debe ser siempre mayor que la longitud de canal acústico real $L_c$ debido a los retardos propios de la conexión Bluetooth.

## Sincronización

La aplicación contempla dos tipos de sincronización:

- Sincronización grabación-reproducción.
- Sincronización entre dispositivos.

La primera es la utilizada durante el proceso de estimación de la RICA y cálculo del retardo, ya que la señal de reproducción *xrep* y la grabada *xrec* deben empezar lo más simultáneamente posible, aunque nunca antes la reproducción que la grabación. La segunda sincronización se refiere a la conexión Wi-Fi, y trata de que el retardo de esta conexión y el offset de tiempo entre dispositivos afecte lo menos posible a la estimación de los canales acústicos cruzados ($\mathbf{c}_{ij}$, con *i* distinto de *j*).

### 4.1 Sincronización Grabación - Reproducción

En primer lugar es importante explicar qué es un hilo de ejecución en Android, denominado **Thread**: es la unidad de procesamiento más pequeña que permite que una aplicación pueda hacer tareas concurrentemente. De esta forma, si se desea reproducir y grabar a la vez, es necesario usar dos hilos de ejecución, uno para grabar (**Recording Thread**) y otro para reproducir (**Reproduction Thread**).

Los dos métodos de Android que se usan en esta operación son:

- *wait()* : El hilo que lo llama espera indefinidamente hasta que le notifican que pare, o bien haya una interrupción inesperada.
- *notify()*: Se usa para hacer despertar (o dejar de esperar) al hilo que se llamó mediante *wait(),* y tiene que ser llamado por otro hilo.

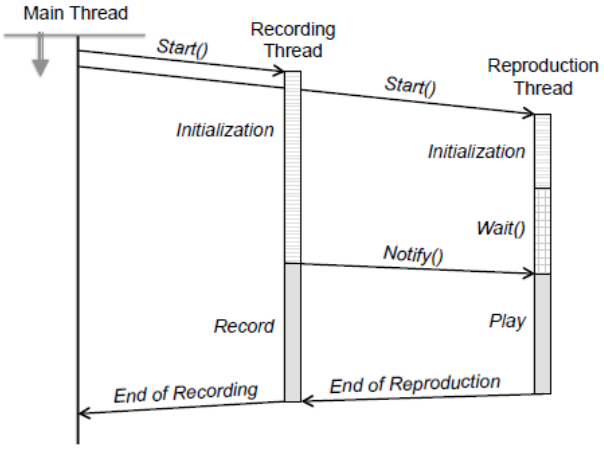



Fig. 4. Procedimiento de sincronización grabación-reproducción.

En general las inicializaciones del **Recording Thread** son más costosas en tiempo que el **Reproduction Thread**, siendo el primero el que utiliza *notify()* y el segundo *wait()*. El esquema de la Figura 4 muestra ambos hilos y sus relaciones.

### 4.2 Sincronización Entre Dispositivos

Esta sincronización ayuda a que la reproducción de un altavoz y la grabación del dispositivo móvil que no está conectado a él empiecen simultáneamente. El procedimiento es el que aparece en el diagrama de la Figura 5. En primer lugar se asignan roles de maestro y esclavo y se establece la conexión. En el establecimiento de la conexión ambos dispositivos obtienen su propia referencia temporal y la almacenan en **tm** y **ts** respectivamente. El maestro ejecuta entonces la inicialización de sus variables y avisa al esclavo, después el maestro se queda esperando y el esclavo ejecuta la inicialización de sus variables y avisa al maestro. En ese momento el maestro coge una nueva referencia temporal **tm1** y le transmite al esclavo la diferencia **tm1-tm**. El esclavo toma entonces su propia referencia temporal **ts1** y calcula el tiempo de retardo o adelanto que lleva respecto al maestro como **(ts1-ts) – (tm1-tm)**. A partir de aquí ambos dispositivos esperan un tiempo fijo mediante el método **Thread.sleep(millisec)**, donde **millisec** son los milisegundos que el dispositivo espera, tal y como se muestra en la parte inferior de la Figura 5.

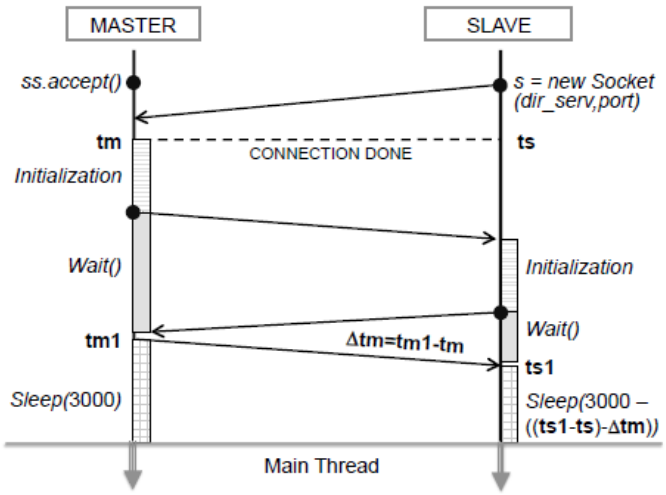



Fig. 5. Procedimiento de sincronización entre dispositivos.

Cabe destacar que esta sincronización debe hacerse con procedimientos ad-hoc como el mostrado en la Figura 5 porque Android no proporciona ningún método directo para poder sincronizar dos dispositivos entre sí, solo para sincronizarlos a una red a través de un servidor, pero cada uno de ellos de forma independiente.

## Conclusiones

En este artículo se ha explicado el desarrollo de una aplicación programada en Android para establecer y gestionar las conexiones y procedimientos básicos necesarios para implementar una WASN que haga usos de dispositivos con dicho sistema operativo (tanto *smartphones* como *tablets*). A lo largo del artículo se han expuesto los pasos necesarios para gestionar y realizar las conexiones Wi-Fi y Bluetooth de los dispositivos, cómo sincronizarlas y como estimar los canales acústicos de la WASN teniendo en cuenta los retardos inherentes a las conexiones y al propio sistema operativo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea FEDER y el Gobierno español a través del proyecto TEC2012-38142-C04, y la Generalitat Valenciana a través del proyecto PROMETEOII/2014/003.

## Referencias

[A2DP2012] **“**Advanced Audio Distribution Profile (A2DP) Specification, version 1.3”**,** Bluetooth Special Interest Group Std., July 2012. [Online]. http://www.bluetooth.org/en-us/specification/adopted-specifications.

[Akyildiz2002] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “A survey on sensor networks”, *Communications Magazine, IEEE*, 40 (8) 102–114 (2002).

[Bertrand2011] A. Bertrand, "Applications and trends in wireless acoustic sensor networks: A signal processing perspective", *in Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), 2011 18th IEEE Symposium on*, pp.1–6 (2011).

[Bertrand2015] A. Bertrand, S. Doclo, S. Gannot, N. Ono, and T. van Waterschoot, “Special issue on wireless acoustic sensor networks and ad hoc microphone arrays,” *Signal Processing*, 107, 1-3 (2015).

[Chen2004] W.-P. Chen, J. Hou, L. Sha, “Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks”, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 3 (3) 258–271 (2004).

[eclipse] https://eclipse.org/

[Ferrer2015] M. Ferrer, M. de Diego, G. Piñero, A. Gonzalez, “Active noise control over adaptive distributed networks”, *Signal Processing*, 107, 82-95 (2015).

[Kardous2014] C.A. Kardous, P.B. Shaw, “Evaluation of smartphone sound measurement applications,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135 (4) 186–192 (2014).

[Kim2014] H. Kim, S. Lee, J.-W. Choi, H. Bae, J. Lee, J. Song, and I. Shin, “Mobile maestro: Enabling immersive multi-speaker audio applications on commodity mobile devices”, *in Proc. 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp ’14)*, 277–288 (2014).

[Maroti2004] M. Maroti, G. Simon, A. Ledeczi, J. Sztipanovits, “Shooter localization in urban terrain”, *Computer*, 37 (8) 60–61 (2004).

[Martinez2004] K. Martinez, J.Hart, R.Ong, “Environmental sensor networks”, *Computer*, 37 (8) 50–56 (2004).

[Puccinelli2005] D. Puccinelli and M. Haenggi, "Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing", *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 5, no. 3, pp. 19–31, 2005.

[Rife1989] D. D. Rife and J. Vanderkooy, “Transfer-function measurement with maximum-length sequences,” *J. Audio Eng. Soc*, 37 (6) 419–444 (1989).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ACELERACIÓN DEL MODELO DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN ACÚSTICA MEDIANTE UNIDAD DE PROCESAMIENTO GRÁFICO (GPU)

PACS: 43.55.Ka

Navarro Ruiz, Juan Miguel[1]. Imbernón, Baldomero[1]. Cecilia, José María[1].
(1) Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Campus de los Jerónimos
30107 Guadalupe, Murcia. España
Tel. +34 968 278 825
Fax. 968 278 581
E-mail:jmnavarro@ucam.edu

## ABSTRACT

In this paper the different programming strategies used to achieve the acceleration of the finite difference solution of the acoustic diffusion equation model for room acoustics are presented. An approach of parallelization of calculations using a graphics processing unit is followed. Three different methods are analyzed and implemented. Moreover, a comparison of performance is done and their advantages and disadvantages are discussed. Using the GPU helps reduce the execution time of this algorithm mainly simulating rooms of large volumes and high spatial resolution.

## RESUMEN

En este trabajo se presentan las diferentes estrategias de programación utilizadas para conseguir acelerar el proceso necesario para el algoritmo en diferencias finitas del modelo de la ecuación de difusión acústica para acústica de salas. Para ello se ha seguido una aproximación de paralelización de los cálculos mediante una unidad de procesamiento gráfico. Se analizan, implementan y comparan las prestaciones de varios métodos discutiendo sus ventajas e inconvenientes. El uso de la GPU permite disminuir el tiempo de ejecución de este algoritmo principalmente para procesamiento de salas de volúmenes y necesidades de resolución espacial grandes.

## INTRODUCCIÓN

Gracias a la aparición de modelos de programación como la Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo, del inglés Compute Unified Device Architecture (CUDA) [1], la implementación de algoritmos en plataformas de cómputo paralelo, tales como las unidades de procesamiento gráfico, del inglés Graphic Processing Unit (GPU) [2], se ha convertido en un problema genérico de programación.

El objetivo de este trabajo es el análisis del uso de computación paralela en GPU para intentar acelerar la ejecución del modelo de la ecuación de difusión acústica [3] en comparación con las prestaciones ofrecidas en una unidad de proceso central (CPU). En general, el modelo de la ecuación de difusión acústica (DEM) muestra buenas prestaciones de cómputo [4]. Sin embargo, el costo computacional de este método se incrementa enormemente cuando se requieren resoluciones espaciales altas y/o la simulación se debe realizar en varias bandas de frecuencia. Para resolver el modelo de la ecuación de difusión acústica se propuso una implementación en diferencias finitas del esquema en tres dimensiones (3D-FD) de Dufort-Frankel [5]. Esta implementación puede ser paralelizada para mejorar la eficiencia y reducir los costes computacionales del modelo.

Las GPUs han sido utilizadas en las principales técnicas de la simulación acústica de recintos como el modelado de trazado de rayos y el modelado basado en ondulatoria [6] [7]. Sin embargo, su aplicación en la implementación 3D-FD de la difusión acústica es algo novedoso [8].

En este trabajo se presentan varias estrategias de programación paralela en GPU utilizadas para conseguir acelerar la implementación 3D-FD de la difusión acústica usando CUDA. En concreto, se describen tres estrategias desarrolladas: maximizar el número de hilos, minimizar el número de hilos usando bloques verticales simples, y minimizar el número de hilos usando un técnica de división por capas o bloques horizontales.

A continuación se realiza un estudio comparativo entre las estrategias, usando como referencia una implementación en el lenguaje secuencial C ejecutándose en una CPU. Para ello, se toma como parámetro el tiempo de duración de la simulación del algoritmo en los diferentes entornos manteniendo la exactitud en los resultados acústicos.

## MODELO DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN ACÚSTICA

En los últimos años, el proceso de difusión que se produce en la energía acústica ha sido utilizado con éxito en diferentes formas de recintos para predecir parámetros de acústica de salas, tales como el tiempo de reverberación y el nivel de presión sonora [9]. Se ha demostrado que el modelo de la ecuación de difusión acústica ofrece resultados precisos principalmente en recintos con baja absorción acústica y al predecir la parte tardía de la respuesta al impulso de la sala [9].

El modelo de la ecuación de difusión consiste en una ecuación en derivadas parciales con unas condiciones de contorno mixtas, donde la densidad de energía sonora $w(\mathbf{r},t)$ en una posición $\mathbf{r}$ definida en un dominio $V$ y en un instante $t$, creada por una fuente sonora $P(t)$ localizada en la posición $\mathbf{r}_s$, se propaga por el recinto [9, 10],

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(\mathbf{r},t)}{\partial t} &= D\nabla^2 w(\mathbf{r},t) + cmw(\mathbf{r},t) \\ &= P(t)\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_s) \ \text{ in } \ V, \qquad (1) \\ -D\frac{\partial w(\mathbf{r},t)}{\partial \mathbf{n}} &= A_X(\mathbf{r},\alpha)cw(\mathbf{r},t) \ \text{ on } \ \partial V. \quad (2) \end{aligned}$$

La Ecuación (1) es una ecuación parabólica homogénea en derivadas parciales, donde $\nabla^2$ es el operador de Laplace y $D = \lambda c/3$ es el coeficiente de difusión, siendo *c* la velocidad del sonido y $\lambda$ es el conocido como camino libre medio [11]. El término *cmw*(***r***,*t*) tiene en cuenta la atenuación atmosférica en el interior del recinto, donde *m* es el coeficiente de absorción del aire [12].

La Ecuación (2) en una condición de contorno mixta que modela los efectos de la absorción de las superficies de la sala en el campo sonoro a través del factor de absorción $A_x(\mathbf{r},\alpha)$, donde $\alpha$ es el coeficiente de absorción [13, 10]. El término **n** representa el vector unitario normal a la superficie.

## ARQUITECTURA UNIFICADA DE DISPOSITIVOS DE CÓMPUTO

El nacimiento de CUDA, presentada por NVIDIA en 2006, y la creación de su API C permitió el acceso a la programación de un GPU mediante un lenguaje de propósito general extendido en la gran mayoría de desarrolladores. En pocos años, este campo se expandió y se convirtió en una de las mejores formas para conseguir grandes prestaciones usando procesadores para el gran público. Tal y como se puede observar en la Figura 1, CUDA está basada en una jerarquía de capas de abstracción; el *thread* (hilo) es la unidad de ejecución básica; los hilos están agrupados en *blocks* (bloques), cada uno de los cuales se ejecuta en un multiprocesador, donde pueden compartir datos en pequeñas memorias pero extremadamente rápidas. Una *grid* (matriz) está compuesto por bloques, los cuales están igualmente distribuidos y organizados entre todos los multiprocesadores.

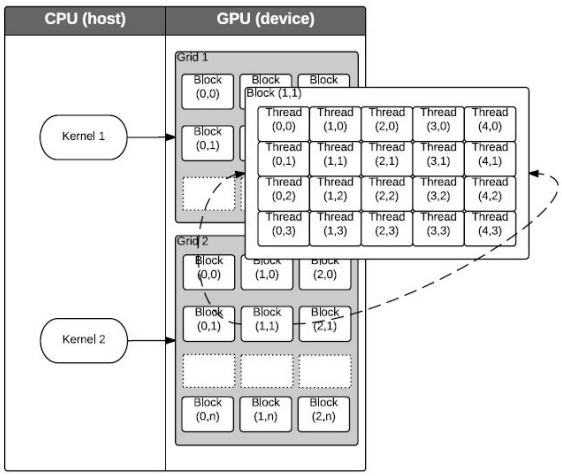



Figura 1: Modelo de programación CUDA

Las secciones paralelas de una aplicación se ejecutan en *kernels* (núcleos) de forma que una sola instrucción mueve múltiples datos (SIMD), o sea, todos los hilos ejecutan el mismo código. Por lo tanto,

un núcleo se ejecuta mediante una matriz de bloques de hilos, donde los hilos se ejecutan en grupos de lotes.

## ALGORITMO SECUENCIAL

Para este trabajo, se ha elegido la solución 3D-FD para la ecuación de difusión acústica es el esquema en diferencias finitas de Dufort-Frankel [14], previamente publicado en [5]. Cuando se aplica una solución basada en diferencias finitas, el dominio del problema se discretiza de tal manera que los valores de la variable dependiente desconocida se calculan sólo en un número finito de puntos nodales o celdas en lugar de en todos los puntos de una región.

Para el algoritmo en formato secuencial se ha seguido un método de matriz múltiple basado en patrones como se muestra en la Figura 2.

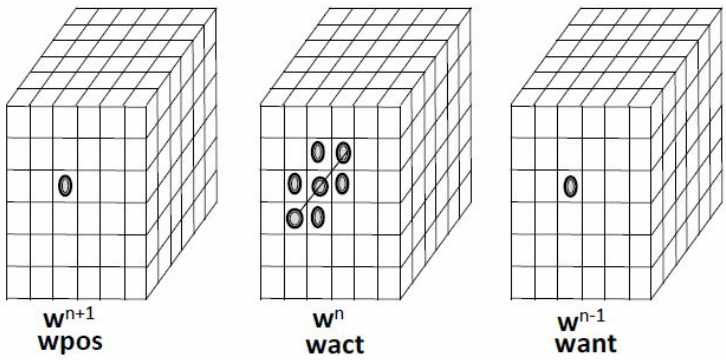



Figura 2: Patrón seguido para la solución 3D-FD del modelo de la ecuación de difusión acústica.

El algoritmo 1 presenta una base secuencial implementando varios bucles que recorren el dominio computacional completo actualizando los valores de cada celda. En él se utilizan tres matrices de variables 3D para el bucle principal: $w_{n+1}$, $w_{n-1}$ y $w_n$.

## IMPLEMENTACIONES EN CUDA

Para poder trabajar con matrices 3D en CUDA, es necesario descomponer los datos en un formato puramente lineal para ser declarados como memoria global de la GPU. En estas implementaciones se ha aplicado el formato de fila para cada capa en el eje *z* [15] para optimizar el acceso a memoria el máximo posible.

Es importante resaltar que, la dimensión de los bloques es un factor determinante en las prestaciones del algoritmo. Por consiguiente, las pruebas han sido realizadas configurando diferentes dimensiones de bloques. En general, las pruebas con dimensiones por encima de 256 hilos por bloque (16x16), obtienen peores prestaciones.

**Versión 1. Estrategia de maximizar los hilos**

En esta primera versión se buscó que el número de hilos a utilizar fuera el máximo posible. Para ello, se utilizan bloques de hilos cuadrados extendidos en 2D [15]. Como el sistema de matrices en la GPU es bidimensional, cada capa en la dimensión *z* se encapsula con un bloque de hilos cuadrado. A continuación, tal y como se muestra en la Figura 3, estas capas se organizan una al lado de la otra en una matriz 2D. Por lo tanto, cada hilo accede independientemente a las direcciones de memoria global que él necesita, pero no utiliza los accesos de los hilos vecinos.

```
1:  for i = 0; i ≤ Iterations; i++ do
2:    for x = 0; x ≤ XDIM; x++ do
3:      for y = 0; y ≤ YDIM; y++ do
4:        for z = 0; z ≤ ZDIM; z++ do
5:          w_{n+1}[x,y,z] = (w_{n-1}(x,y,z) * (1 − β_0)+
6:          β_{0_x} * (w_n(x+1,y,z) + w_n(x−1,y,z))+
7:          β_{0_y} * (w_n(x,y+1,z) + w_n(x,y−1,z))+
8:          β_{0_z} * (w_n(x,y,z+1) + w_n(x,y,z−1))−
9:          2 * dt * c * m * w_n(x,y,z)+
10:         2 * dt * P_n(x,y,z))/(1 + β_0);
11:       end for
12:     end for
13:   end for
14: end for
```

Algoritmo 1: Pseudocódigo secuencial para el cálculo de la propagación de la densidad de energía acústica.

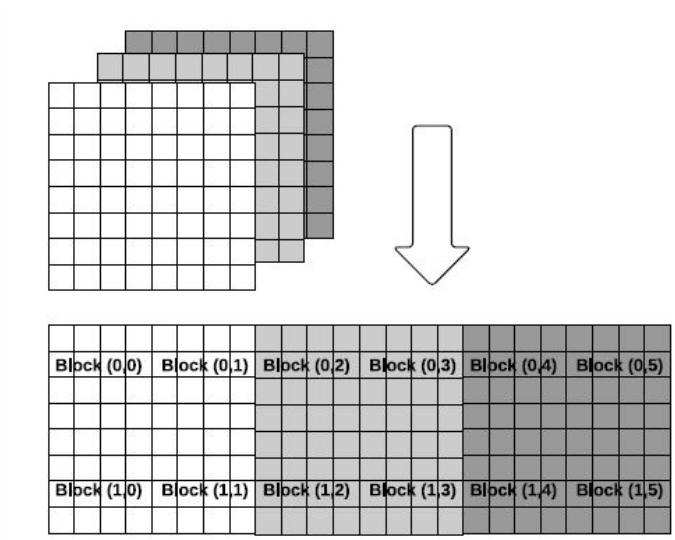



Figura 3: Patrón de matriz usada en la estrategia de maximizar los hilos.

**Versión 2. Estrategia de minimizar los hilos con bloques verticales 2D**

La segunda versión está basada en intentar minimizar el número de hilos. Para ello, se divide el cubo discretizado en bloques verticales 2D, uno por cada coordenada (*x*, *y*) de tamaño *z*, al que se le asigna un hilo. Como se observa en la Figura 4, estos hilos iteran a través del eje *z*. La diferencia radica en que esta iteración permite que los hilos dentro del mismo bloque puedan compartir información a través de la memoria compartida y el archivo de registros de la GPU, aprovechando la ventaja que ofrecen los datos locales.

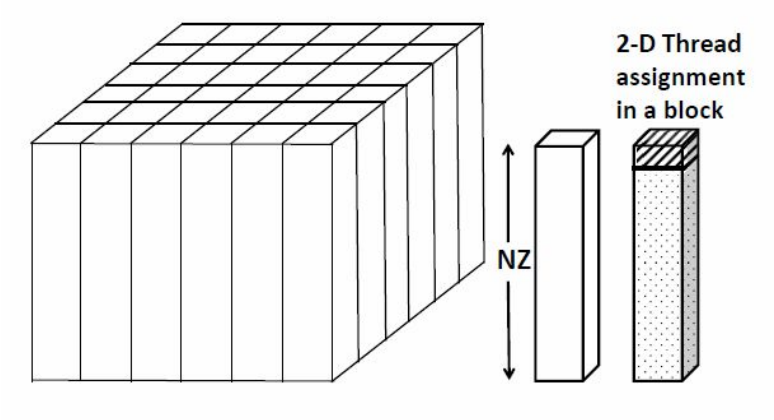



Figura 4: Patrón para la versión de bloques verticales 2D.

**Versión 3. Estrategia de minimizar los hilos con bloques horizontales 2D**

La tercera versión también está basada en la creación de bloques en 2D, pero en este caso se usa una división por capas [16]. Cada una las capas en los ejes *x* e *y* se convierte en un hilo 2D, tal y como se ilustra en la Figura 5. Esta versión usa la memoria compartida de la GPU para almacenar y compartir los datos de cada capa con los otros hilos.

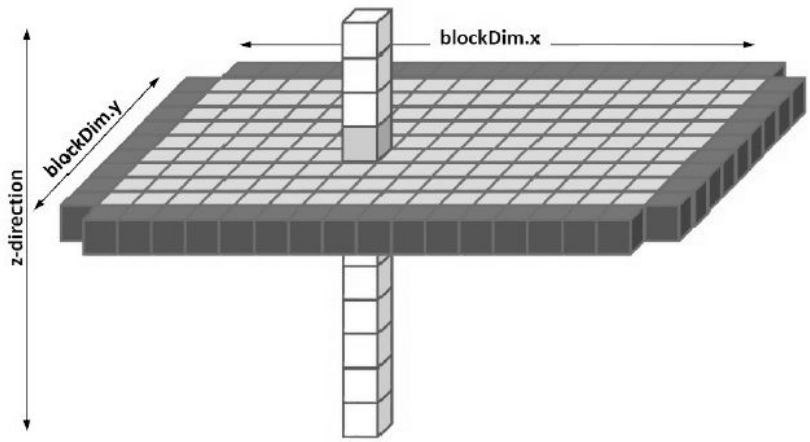



Figura 5: Patrón para la versión de bloques horizontales 2D.

## PRUEBAS Y DISCUSIÓN

El servidor utilizado en las pruebas dispone de una CPU Intel Xeon a 3,10 GHz con 8 MBytes de memoria cache, quad-core y 8 GBytes de memoria RAM. Además, tiene instaladas dos modelos de tarjetas GPU de NVIDIA, una Tesla K20c [17] y una GeForce GTX 850 [18], que permite comparar las prestaciones de dos generaciones tecnológicas diferentes.

Los datos utilizados como parámetros de entrada en las simulaciones corresponden con los aplicados en la referencia [5] por razones comparativas tanto de prestaciones como de resultados acústicos. Se ha discretizado un recinto cúbico de 8x8x8 $m^3$ y cuatro configuraciones diferentes de distribuciones de absorción que se muestran en la Tabla 1. Además, se usan tres resoluciones espaciales diferentes para discretizar la sala: 128x128x128, 256x256x256 y 352x352x352 celdas. La simulación se realiza para obtener 1 segundo de duración de la respuesta al impulso.

| COEFICIENTE DE ABSORCIÓN | SUELO | TECHO | PARED FRONTAL | OTRAS PAREDES |
|---|---|---|---|---|
| ROOM A | 0,1666 | 0,1666 | 0,1666 | 0,1666 |
| ROOM B | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ROOM C | 0,5 | 0,5 | 0 | 0 |
| ROOM D | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 |

Tabla 1: Distribución de los coeficientes de absorción de las cuatro configuraciones de la sala.

En la Tabla 2 se aporta información de los órdenes de aceleración (speed-up) de las tres versiones frente al tiempo de ejecución del código secuencial en CPU. A la hora de crear los bloques se han usado diferentes dimensiones, aunque se muestran los resultados que dan mejores prestaciones.

Para resoluciones espaciales pequeñas, es decir menor número de celdas, los resultados en ambos modelos de GPU son similares para las tres versiones. Sin embargo, cuando el tamaño del problema aumenta, mayor número de celdas, la segunda versión saca ventaja a todas las demás. Además, las prestaciones de la Tesla K20C son mayores que la GTX 580 cuando el número de celdas aumenta.

Para la primera versión, se consiguen los mejores tiempos con un tamaño de bloque de 16x16 (256 hilos) llegando a 8,2 veces, para la configuración Room C, frente al tiempo de ejecución en CPU. Con un tamaño de bloque de 32x8 (256 hilos) se obtienen los mejores resultados usando la segunda versión de la implementación alcanzando una aceleración de 15,3 veces en los tamaños de celda más pequeños. La última versión combina acceso a memoria global y compartida. Se observa en la Tabla 2, en este caso, como el modelo GTX 580 toma una pequeña ventaja sobre la Tesla K20C. Sin embargo, la aceleración conseguida no es mayor a la obtenida en la segunda versión siendo el tamaño óptimo de 32x8 otra vez.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han investigado las posibilidades de acelerar el algoritmo secuencial de la implementación 3D-FD del modelo de la ecuación de difusión acústica. Se han comparado tres estrategias programadas en CUDA: maximizar el número de hilos y minimizar el número de hilos usando bloques 2D verticales y horizontales respectivamente.

En general, la versión de bloques verticales 2D ha obtenido los mejores resultados con una aceleración del tiempo de ejecución de hasta 15,3 veces superior al algoritmo ejecutándose en CPU. Ambos modelos de GPU probados, Tesla K20C y GTX 580, ofrecen prestaciones similares para estos tamaños de discretización. Sin embargo, la tendencia de los resultados indica que cuando el número de celdas se incrementa, la Tesla K20C puede superar a la GTX 580. Las distribución de la absorción en la sala no afecta a las prestaciones computacionales de las implementaciones, aunque se ha comprobado que la precisión de los resultados acústicos se mantiene.

Varios estudios pueden proponerse para un futuro después de este trabajo. Por un lado, NVIDIA está en continua evolución sacando nuevas generaciones de arquitecturas con mayor número de núcleos. Además, las nuevas arquitecturas de CPU de Intel incorporan varias CPU en un solo chip [19]. Estas plataformas pueden mejorar las prestaciones de la implementación de bloques verticales 2D. A nivel de simulación acústica de recintos, las salas reales tiene formas más irregulares, por lo que se hace necesario la creación de estrategias de voxelización y tamaños de bloques 2D dinámicos que deben ser investigados.

| ROOM SET UP | CUDA Speed-up Version 1 | | CUDA Speed-up Version 2 | | CUDA Speed-up Version 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ROOM A | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 |
| 128 x 128 x 128 | 7.8 | 7.2 | 8 | 9.3 | 6.3 | 6.3 |
| 256 x 256 x 256 | 7.9 | 7.1 | **14.6** | **12.6** | 9 | 9.4 |
| 352 x 352 x 352 | 7 | 6.6 | **14.6** | **13.2** | 8.3 | 8.9 |
| ROOM B | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 |
| 128 x 128 x 128 | 7.6 | 6.9 | 7.7 | 9 | 6.1 | 6.1 |
| 256 x 256 x 256 | 7.9 | 7.1 | 14.6 | 12.6 | 9 | 9.4 |
| 352 x 352 x 352 | 7 | 6.5 | 14.6 | 13.2 | 8.3 | 8.9 |
| ROOM C | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 |
| 128 x 128 x 128 | 7.6 | 7 | 7.7 | 9.1 | 6.1 | 6.2 |
| 256 x 256 x 256 | **8.2** | 7.3 | **15.3** | 13 | 9.3 | **9.7** |
| 352 x 352 x 352 | 7.4 | 6.9 | **15.3** | 13.9 | 8.7 | 9.4 |
| ROOM D | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 | TESLA K20C | GTX 580 |
| 128 x 128 x 128 | 7.8 | 7.2 | 8 | 9.4 | 6.3 | 6.3 |
| 256 x 256 x 256 | 7.8 | 7 | 14.6 | 12.4 | 8.9 | 9.3 |
| 352 x 352 x 352 | 7.4 | 6.9 | **15.3** | 13.9 | 8.7 | 9.4 |

Tabla 2: Aceleración (speed-up) de las tres versiones en los dos modelos de GPU en comparación con la versión de código secuencial en CPU.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está conjuntamente apoyado por los fondos del Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte MECD español y FEDER europeo bajo el proyecto ref. TEC2012-37945-C02-01 y la UCAM Universidad Católica San Antonio bajo el proyecto ref. PMAFI-02-14.

**REFERENCIAS**

[1] NVIDIA, NVIDIA CUDA C Programming Guide 6.5. 2014.
[2] M. Garland, S. Le Grand, J. Nickolls, J. Anderson, J. Hardwick, S. Morton, E. Phillips, Y. Zhang, and V. Volkov, “Parallel Computing Experiences with CUDA," IEEE, Micro, vol. 28, pp. 13-27, July 2008.
[3] J. Picaut, L. Simon, and J.-D. Polack, “A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation," Acta Acust. United Ac., vol. 83, pp. 614-621, 1997.
[4] J. M. Navarro, J. E. Noriega, J. Escolano, and J. J. Lopez, “A comparative evaluation between numerical techniques for implementing the acoustic diffusion equation model," in Audio Engineering Society Convention 132, Audio Engineering Society, 2012.
[5] J. M. Navarro, J. Escolano, and J. J. Lopez, “Implementation and evaluation of a diffusion equation model based on finite difference schemes for sound field prediction in rooms," Applied Acoustics, vol. 73, no. 6-7, pp. 659- 665, 2012.
[6] L. Savioja, D. Manocha, and M. Lin, “Use of gpus in room acoustic modeling and auralization," in Proc. Int. Symposium on Room Acoustics, 2010.
[7] J. J. López, D. Carnicero, N. Ferrando, and J. Escolano, “Parallelization of the finite-difference time-domain method for room acoustics modelling based on CUDA," Mathematical and Computer Modelling, vol. 57, no. 78, pp. 1822-1831, 2013.
[8] J. J. López, J. M. Navarro, D. Carnicero, and J. Escolano, “Some comments about graphic processing unit (gpu) architectures applied to finite-difference time-domain (fdtd) room acoustics simulation: Present and future trends," in Proceedings of Meetings on Acoustics, vol. 19, Acoustical Society of America, 2013.
[9] V. Valeau, J. Picaut, and M. Hodgson, “On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction," J. Acoust. Soc. Am., vol. 119, no. 3, pp. 1504-1513, 2006.
[10] Y. Jing and N. Xiang, “On boundary conditions for the diffusion equation in room acoustic predictions: Theory, simulations, and experiments," J. Acoust. Soc. Am., vol. 123, pp. 145-153, 2008.
[11] P. M. Morse and H. Feshbach, Methods of Theoretical Physics. New York: McGraw-Hill, 1953.
[12] A. Billon, J. Picaut, C. Foy, V. Valeau, and A. Sakout, “Introducing atmospheric attenuation within a diffusion model for room-acoustic predictions," J. Acoust. Soc. Am., vol. 123 (6), pp. 4040-4043, 2008.
[13] J. M. Navarro, F. Jacobsen, J. Escolano, and J. J. Lopez, “A theoretical approach to room acoustic simulations based on a radiative transfer model," Acta Acust. United Ac., vol. 96, pp. 1078-1089, 2010.
[14] E. C. Dufort and S. P. Frankel, “Stability conditions in the numerical treatment of parabolic differential equations," Mathematical tables and others aids to computation, vol. 7, pp. 135-152, 1953.
[15] C. J. Webb and S. Bilbao, “Virtual room acoustics: A comparison of techniques for computing 3d-fdtd schemes using cuda," in Audio Engineering Society Convention 130, Audio Engineering Society, 2011.
[16] P. Micikevicius, “3D nite difference computation on GPUs using CUDA," in Proceedings of 2nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units, pp. 79-84, ACM, 2009.
[17] “Nvidia corporation. the kepler architecture."
http://www.nvidia.com/content/PDF/kepler/NVIDIA-Kepler-GK110-Architecture-Whitepaper.pdf.
[18] “Nvidia corporation. the fermi architecture."
http://www.nvidia.com/content/pdf/fermi_white_papers/nvidia_fermi_compute_architecture_whitepaper.pdf.
[19] R. Rahman, “Xeon phi system software," in Intel Xeon Phi Coprocessor Architecture and Tools, pp. 97-112, Springer, 2013.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MEJORAS Y PREFERENCIAS DE LOS USUARIOS EN LA AURALIZACIÓN PARA SISTEMAS DE MULTICONFERENCIA UTILIZANDO SONIDO BINAURAL

REFERENCIA PACS: 43.60.Dh

Aguilera, Emanuel; Lopez, Jose Javier; Gutierrez-Parera, Pablo

Universidad Politécnica de Valencia
ITEAM, Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
Camino de Vera s/n, Edificio 8G, acceso D
46022 Valencia (España)
Tel: +34 963 877 007 (Ext. 73008) Fax: +34 963 879 583
emagmar@iteam.upv.es, jjlopez@dcom.upv.es, pabgupa@iteam.upv.es

## ABSTRACT

The introduction of spatial audio in multi-party teleconferencing systems create more realistic and immersive communication environments compared to monaural systems. Moreover, the introduction of auralization can increase the immersion but at the expenses of a reduced intelligibility. In this paper, by means of subjective testing, we analyze the influence on user preferences of some specific auralization processing details (in relation to early echoes and late reverberation) and a simple near-field HRTF processing. This way, we study a trade-off between realism and intelligibility in a multi-party teleconferencing system with binaural audio developed for mobile terminals.

## RESUMEN

La introducción de audio espacial en sistemas de multiconferencia produce entornos de comunicación más realistas e inmersivos que los sistemas monoaurales. Además, añadir auralización puede incrementar la inmersión a costa de reducir la inteligibilidad. En este trabajo, por medio de varios tests subjetivos, se analiza la influencia de algunos detalles más específicos de la auralización (en relación a las primeras reflexiones y reverberación tardía) y de un cálculo simple de HRTF en campo cercano en la preferencia de los usuarios. Se estudia así una solución de compromiso entre realismo e inteligibilidad en un sistema de multiconferencia con audio binaural desarrollado para dispositivos móviles.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los servicios de telecomunicación que permiten celebrar reuniones han mejorado en los últimos años con sistemas como las multiconferencias. Estas tecnologías se han adoptado rápidamente en el ámbito de los negocios porque permiten ahorrar mucho tiempo y gastos en viajes [1,2], pero también son útiles para el público general. Por esta razón desde hace mucho tiempo las empresas han estado usando estos servicios a través de la red de telefonía fija.

Del mismo modo, un terminal móvil también puede usar servicios de multiconferencia [3]. La primera y más obvia ventaja es que los usuarios empresariales ganan movilidad fuera de sus oficinas. Por otra parte, con un sistema de acceso y tarifas adecuado, este servicio puede ser también atractivo para usuarios particulares (no empresariales) que podrían realizar reuniones de audio con amigos y familiares desde cualquier lugar. Además, hoy en día los terminales móviles tienen muchas más prestaciones que los terminales de telefonía fija, que han sido relegados prácticamente solo a comunicaciones de voz. Aprovechando las capacidades de los nuevos terminales móviles inteligentes es posible realizar multiconferencias más realistas, ubicuas e inmersivas. Una de las mejoras más atractivas está relacionada con la incorporación de audio espacial a la conferencia [3,4].

En anteriores trabajos se ha demostrado que el audio espacial (estéreo o binaural) es preferido por los usuarios más que el audio monoaural no espacial [4,5], mejorando la discriminación del hablante [5,6] y la inteligibilidad de las conversaciones ya que se aprovecha la habilidad del sistema auditivo humano de prestar una atención selectiva a los sonidos de una determinada dirección (“*cocktail party effect”*). Por otra parte, la incorporación del efecto de sala (auralización) en la audioconferencia produce resultados controvertidos según estudios anteriores [7], ya que, aunque incrementa la percepción de distancia, degrada la dirección de la fuente de audio y su inteligibilidad.

Los autores de este artículo presentaron recientemente un trabajo [8] investigando individualmente la influencia de las primeras reflexiones, la reverberación tardía y otros detalles que normalmente se emplean en los métodos de auralización clásicos. Los resultados mostraron que para este tipo de aplicación los usuarios prefieren la inteligibilidad sobre la sensación realista de distancia, de modo que en los test de usuario la señal limpia o solo con una simple auralización obtuvo mejores resultados que una compleja y completa auralización. En concreto, la reverberación tardía obtuvo mejor sensación de distancia pero peor inmersión que usando las primeras reflexiones.

En este trabajo se propone una nueva versión del sistema de multiconferencia inmersiva para dispositivos móviles que mejora el anterior introduciendo mejores algoritmos y un ajuste fino de los efectos de auralización al mismo tiempo que se presentan todos los test subjetivos realizados para llegar a estas mejoras. Una nueva característica de esta versión del software es que un usuario puede comenzar una conversación privada con cualquiera de los participantes de la multiconferencia acercando mucho el avatar del otro. Esta función se llama “modo susurro” porque ambos en la conversación privada se escuchan como si hablaran muy cerca mientras siguen escuchando al resto del grupo en el fondo.

De nuestro anterior trabajo se deduce que en una teleconferencia los usuarios prefieren una señal limpia a una señal con una fuerte auralización, pero ahora se pretende averiguar si una auralización sutil puede mejorar este tipo de aplicaciones. Usando este sistema se han analizado algunos ajustes finos de la auralización y del procesado HRTF de la audioconferencia por medio de test subjetivos a voluntarios. La idea es investigar la influencia de tres aspectos diferentes por medio de los tests:

- Diferentes valores de reflexión de las paredes virtuales para el cálculo de las primeras reflexiones.
- Diferentes valores para el cálculo la reverberación tardía.
- La introducción de un procesado HRTF de campo cercano para las fuentes virtuales que están muy cerca de la cabeza para el “modo susurro” de nuestra aplicación.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: el apartado 2 describe el desarrollo del software utilizado en los experimentos y la tecnología relacionada, incluyendo los algoritmos de auralización utilizados. La sección 3 describe el experimento subjetivo y sus objetivos. El apartado 4 expone los resultados así como su análisis y discusión. Por último la sección 5 presenta las conclusiones de este trabajo.

## 2. IMPLEMENTACIÓN

Para la realización del test se ha utilizado una aplicación de multiconferencia desarrollada en el grupo de investigación y que funciona sobre teléfonos inteligentes y tabletas. El software permite a los participantes controlar fácilmente su uso por medio de una interfaz gráfica y táctil. Esta aplicación utiliza audio binaural usando un modelo simple de HRTF (*Head-Related Transfer Function*). Cada usuario puede mover y colocar virtualmente a los otros participantes alrededor de su propia posición en la mitad del borde inferior. Se puede encontrar una descripción completa de la aplicación en [9].

### 2.1. Sonido binaural

En la práctica, las funciones HRIR (*Head-Related Impulse Response*) tienen una longitud entre 128 y 512 muestras. Convolucionar cada señal mono con las dos HRIR supone un importante coste computacional. A pesar de que estas convoluciones se puedan realizar en el dominio frecuencial con multiplicaciones FFT (usando algoritmos *overlap-add* u *overlap-save*) de un modo eficiente, este proceso sigue teniendo un gran coste. Y aunque hoy en día los teléfonos inteligentes tienen suficiente potencia para realizar en tiempo real estos algoritmos de filtrado, se tendría que utilizar un gran parte de los recursos computacionales en esta etapa de procesado, reduciéndose también la duración de la batería.

Por estas razones se ha pensado en una implementación eficiente de la HRTF para esta aplicación. Para simplificar mucho el coste computacional se ha implementado una aproximación de la HRTF que proporciona una síntesis suficientemente buena.

La implementación de la HRTF se ha dividido en dos partes. Primero se ha implementado la ILD (*Interaural Level Difference*) con dos filtros IIR (*Infinite Impulse Response*). Segundo, la ITD (*Interaural Time Difference*) se ha conseguido añadiendo un retardo temporal entre las señales del oído izquierdo y derecho. El diseño de los filtros ILD IIR se ha realizado siguiendo un procedimiento similar a [10], donde los autores obtuvieron un modelo HRTF estándar promediando las respuestas de una base de datos de respuestas HRTF reales. Usando la respuesta promediada, se ha ajustado un filtro IIR de 6º orden paramétrico para cada dirección azimut. Se pueden encontrar más detalles de esta implementación en [9].

### 2.2. Procesado binaural de la distancia y el campo cercano

La sensación de distancia se consigue aplicando una atenuación a la señal directa dependiente de la posición de la fuente sonora y añadiendo las técnicas de auralización que se describen en la siguiente subsección. Para distancias más allá de 1 m, la HRTF prácticamente no varía para un ángulo de llegada dado ya que las ondas sonoras se pueden considerar planas. Pero para distancias más bajas (campo cercano), Brungart y Rabinowith [11] mostraron que la HRTF es dependiente de la distancia debido a la interacción de la curvatura del frente de onda con la cabeza, el torso y el pabellón auricular. De esta forma la ILD (diferencia de nivel interaural) aumenta para cortas distancias, habiendo mayor diferencia de nivel en altas frecuencias.

Varios trabajos, como [12,13], describen métodos para sintetizar HRTFs de campo cercano a partir de HRTFs de campo lejano obteniendo una gran fidelidad en la localización sonora. En esta aplicación de multiconferencia no es necesario conseguir una correspondencia exacta de la distancia, es más importante la percepción de distancias relativas, por eso se han evitado algoritmos complejos para campo cercano y se aplica una aproximación mucho más simple.

El algoritmo que se utiliza cuando las fuentes sonoras están muy cerca del sujeto aplica una atenuación de ganancia al oído opuesto dependiendo de la distancia y el ángulo, obteniendo la mayor diferencia cuando la fuente sonora está pegada a un oído. En esta simple aproximación no se está teniendo en cuenta el comportamiento para diferentes frecuencias que podría mejorar la sensación de distancia.

### 2.3. Auralización

La aplicación simula que los participantes están en una habitación virtual cuyo tamaño se extiende por la pantalla. El algoritmo de auralización tiene que simular las reflexiones y otros efectos acústicos que suceden en una sala teniendo en cuenta la posición de los participantes y del oyente. Existen muchos métodos precisos para modelar la respuesta al impulso de una sala, RIR (*Room Impulse Response*), entre dos puntos de la sala, muchos de ellos basados en modelos físicos de la propagación del sonido. Para esta aplicación no es necesario un método demasiado preciso, basta con uno que produzca una sensación realista.

La RIR se describe generalmente como la composición de una señal directa, primeras reflexiones y una cola de reverberación. Nuestra aplicación calcula las primeras reflexiones usando el método de la imagen. Se tienen en cuenta los cuatro ecos que proceden de las reflexiones de primer orden de las paredes laterales. Adicionalmente la aplicación procesa las reflexiones binauralmente considerando la dirección de llegada. Para la cola de reverberación se utiliza un reverberador clásico de Schroeder [14] ajustando los coeficientes al tiempo de reverberación deseado.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se ha diseñado el experimento para encontrar las mejores técnicas y parámetros de auralización y procesado de campo cercano para un sistema de multiconferencia. Para medirlo, los participantes han probado el sistema con diversas opciones y han puntuado su percepción de la inteligibilidad, sensación de distancia, inmersión y preferencia general.

El test se ha realizado con una tableta iPad usando auriculares Sennheiser HD 439. Estos auriculares son de tipo cerrado para tener un buen aislamiento del ruido externo y circumaurales porque producen menos fatiga y son más cómodos de llevar puestos. En el experimento han participado un total de 10 personas (6 hombres y 4 mujeres), todos sin problemas de audición con edades comprendidas entre los 23 y 42 años, siendo estudiantes y personal de diferentes grupos de investigación de la universidad.

Por medio de nuestra aplicación en la tablet se presentó a los participantes una grabación de voz. Se invitó a los participantes a mover interactivamente el avatar con la pantalla táctil a diferentes posiciones de la sala virtual todo lo que quisieran durante el test para que notaran como la percepción espacial cambia con la posición y con las diferentes técnicas de procesado. La aplicación muestra unos botones (figura 1) en la pantalla para cambiar de forma ciega entre las diferentes opciones de procesado. Además cada test fue repetido dos veces por cada participante con dos voces grabadas diferentes (una voz de hombre y otra de mujer). El experimento se dividió en dos partes A y B.

### 3.1. Experimento A

El propósito de este primer experimento es encontrar la técnica de auralización más adecuada teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el trabajo anterior de estos autores [8]. En dicho trabajo se descubrió que los participantes rechazaban una auralización fuerte al no ser confortable para este tipo de aplicación, pero los resultados mostraron que una auralización menor podía servir para conseguir cierta sensación de distancia y presencia sin variar mucho la inteligibilidad. Por ello, para este test es interesante ajustar una auralización más sutil. Se les pidió a los participantes puntuar de forma ordenada cada opción técnica evaluando 4 parámetros: inteligibilidad, sensación de distancia, inmersión y preferencia general.

Se usan las dos partes principales del RIR: las primeras reflexiones y la reverberación tardía. Para las primeras reflexiones se había encontrado previamente que una pequeña sala virtual

(5x3.75m) conseguía mejores resultados que una sala más grande, pero el alto coeficiente de reflexión (r=0.9) de las paredes usado en ambas salas era perjudicial para la sensación de distancia debido a la alta potencia de las reflexiones. Así que en este experimento se han usado las mismas dimensiones de la sala pequeña con un menor coeficiente de reflexión (r=0.3) de las paredes para compararlo con el previo. Para la reverberación se encontró previamente que era la mejor técnica para la percepción de distancia si se usaba aisladamente, pero parecía exagerada (se usó un tiempo de reverberación de 340 ms). Por eso en este experimento se ha usado un tiempo de reverberación menor (190 ms) comparándolo para lograr una experiencia más realista.

Al haber primeras reflexiones con baja (EE_L) y alta reflexión (EE_H), y reverberación tardía corta (R_S) y larga (R_L), y considerando que se pueden usar solos o combinados hay 8 posibles opciones. Las pruebas internas preliminares mostraron que las diferencias entre opciones eran demasiado pequeñas para compararlas todas a la vez. Así que se decidió dividir este test en dos fases más fáciles de comparar para los participantes:

- Fase A-1: en esta primera fase se pretende encontrar los mejores parámetros dentro de cada grupo de opciones similares. Por tanto los participantes tuvieron que comparar de forma separada los dos primeras reflexiones sin reverberación (EE_L y EE_H) entre ellas, las dos reverberaciones tardías sin primeras reflexiones (R_S y R_L) entre ellas, y las 4 combinaciones (EE_L+R_S, EE_L+R_L, EE_H+R_S y EE_H+R_L) entre ellas. Cuando todos los participantes acabaron, se evaluó sus puntuaciones en cada aspecto para elegir la mejor opción de primeras reflexiones, reverberación y combinación de ambas, obteniendo así tres técnicas para la siguiente fase.
- Fase A-2: en la segunda fase tuvieron que comparar únicamente las tres mejores opciones de la fase anterior (se analiza en siguiente sección) de forma que las diferencias entre ellas fueran más fáciles a la hora de puntuar cada parámetro.

### 3.2. Experimento B

En esta parte se ha evaluado el procesado de HRTF para campo cercano. Es importante potenciar el efecto de voz cercana para la aplicación desarrollada porque hay un “modo susurro” donde dos personas del grupo hablan privadamente como si estuvieran muy cerca.

Se pidió a los participantes que compararan la sensación de distancia cercana usando el algoritmo simple explicado en la sección 2.2 y sin él. Como en el experimento A, los participantes repitieron el test con dos voces grabadas distintas de forma ciega, es decir, sin saber que técnica se escondía detrás de cada botón de opción.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Experimento A-1

Los participantes evaluaron cuatro parámetros (inteligibilidad, sensación de distancia, inmersión y preferencia general) para 3 grupos de comparación.

La primera comparación se hizo aplicando solo primeras reflexiones a la señal con coeficientes de reflexión bajo (r=0.3) y alto (r=0.9) de las paredes. La figura 2 muestra como al usar bajo coeficiente de reflexión (EE_L) se obtiene mejor resultados para todos los parámetros. Es lógico puesto que un sonido reflejado alto puede enmascarar el sonido directo y producir una señal más sucia y confusa a los receptores.

La segunda comparación se hizo aplicando solo la reverberación tardía a la señal con un tiempo de reverberación más corto (190 ms) y otro más largo (340 ms). La figura 3 muestra que una reverberación más corta (R_S) obtiene mejores resultados excepto para la inmersión.

En la tercera comparación se evaluaron las 4 combinaciones de primeras reflexiones y reverberación tardía. La figura 4 muestra que los mejores resultados para todos los parámetros se obtuvieron con la combinación de baja reflexión y larga reverberación (EE_L+R_L). Si se observan las combinaciones a pares, las combinaciones con alta reflexión tienen siempre los peores resultados. Significa que los malos resultados que dan la alta energía reflejada por las paredes virtuales en la primera comparación cuando estaban a solas se mantienen cuando se añade reverberación. Contrariamente, el comportamiento de la reverberación tardía es diferente cuando se le añaden las primeras reflexiones, reduciéndose mucho las diferencias percibidas entre colas de reverberación cortas y largas. Es más, la cola larga de reverberación es puntuada ligeramente mejor que la corta cuando se mezcla.

Por último, se puede señalar que la inmersión no tiene resultados muy claros, las puntuaciones son muy parecidas en todas las opciones. Al preguntar a los participantes qué habían considerado al evaluar la inmersión mostró que significaba algo distinto para cada uno porque cada uno esperaba estar en un diferente tipo de sala virtual, así que lo que percibían no siempre se correspondía con lo que esperaban perdiendo por tanto inmersión.

### 4.2. Experimento A-2

Se han evaluado los mismos cuatro parámetros (inteligibilidad, sensación de distancia, inmersión y preferencia general) pero ahora comparando únicamente las tres mejores opciones anteriores: solo primeras reflexiones con bajo (r=0.3) coeficiente de reflexión (EE_L), solo corta (190 ms) reverberación tardía (R_S) y la combinación EE_L+R_L (r=0.3 y 340 ms).

La figura 5 muestra como usando únicamente la reverberación tardía (R_S) se obtienen los mejores resultados. Es la mejor opción no solo para tener una buena sensación de realismo y distancia sino también por ser la más inteligible y preferida por los participantes.
Mezclar ambas técnicas de primeras reflexiones y reverberación tardía es la opción menos preferida por los participantes teniendo menos inteligibilidad e inmersión. Pero la percepción de la distancia mejora cuando la reverberación tardía se añade a las primeras reflexiones. No es un comportamiento nuevo; lo mismo se obtuvo en el trabajo anterior de estos autores [8].

### 4.3. Experimento B

Este experimento fue realmente simple: se preguntó por la mejor sensación de distancia para posiciones de campo cercano, es decir, cerca de la cabeza. La figura 6 muestra que aplicando el algoritmo binaural simple para campo cercano obtuvo apenas un poco mejor resultado que sin aplicarlo a cortas distancias. En cualquier caso, considerando el intervalo de confianza, no es una gran diferencia aunque quizás interesante al usar tan poca CPU para este algoritmo.

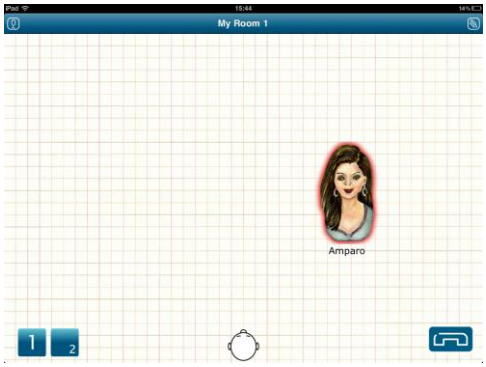



Figura 1. Pantalla principal de la aplicación en tableta

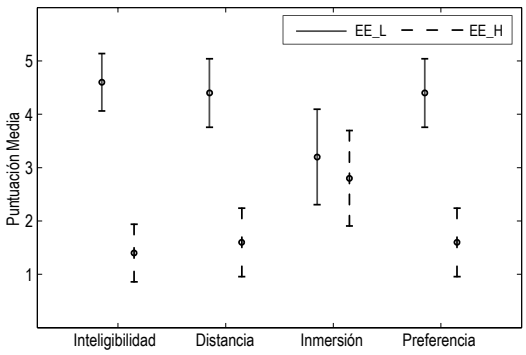



Figura 2. Comparación coeficiente reflexión bajo (EE_L) y alto (EE_H) usando primeras reflexiones (IC 95%)

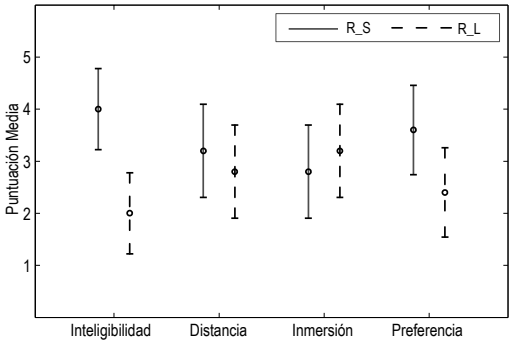



Figura 3. Comparación cola de reverberación corta (R_S) y larga (R_L) usando reverberación tardía (IC 95%)

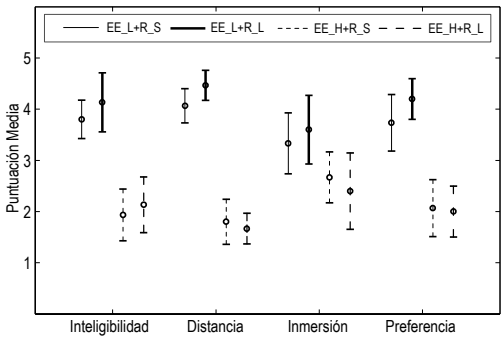



Figura 4. Comparación combinando primeras reflexiones y reverberación tardía (IC 95%)

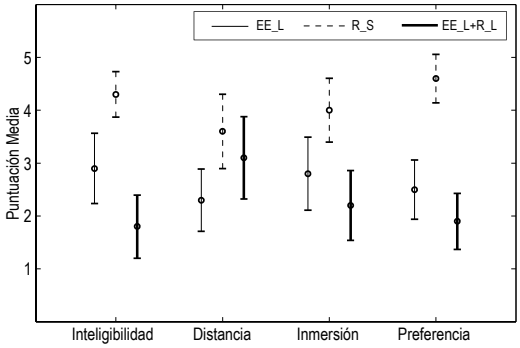



Figura 5. Comparación de las tres técnicas seleccionadas (IC 95%)

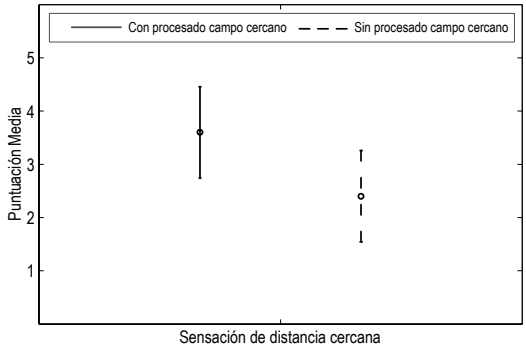



Figura 6. Sensación de proximidad para procesado binaural de campo cercano (IC 95%)

## 5. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se han realizado varios experimentos subjetivos en el contexto de un sistema de teleconferencia binaural donde se aplica auralización. El principal objetivo ha sido evaluar y hacer un ajuste fino de variaciones sutiles relacionadas con la composición de la respuesta al impulso de la sala, como las primeras reflexiones y la reverberación tardía. Adicionalmente se ha evaluado la percepción de la distancia en campo cercano con un algoritmo muy simple. En las secciones anteriores se analizan en detalle la inteligibilidad, sensación de distancia, inmersión y preferencia general obtenidas pudiéndose extraer dos conclusiones principales:

- La sensación de distancia en un sistema de multiconferencia binaural se puede mejorar y mantener a la vez una buena inteligibilidad añadiendo una auralización suave, siendo la mejor técnica sintetizar únicamente una cola moderada de reverberación tardía de unos 200 ms. Se puede realizar utilizando muy poca CPU siendo suficientemente bueno para los usuarios de este tipo de servicios.
- Cuando percibir cortas distancias es importante en una aplicación (como en el “modo susurro” para tener conversaciones privadas), se pueden aplicar técnicas binaurales de campo cercano. Un algoritmo muy simple aumentando el nivel de diferencia interaural al acercarse una fuente sonora al oído mejora el efecto de fuentes cercana con muy poco coste computacional.

En cualquier caso, el realismo que se obtiene al implementar el procesado de HRTF en campo cercano se puede mejorar mucho si se usara un filtro dependiente de la frecuencia. Como

trabajo futuro para este tipo de sistemas se debería desarrollar y probar algoritmos de bajo coste cambien las diferencias de nivel interaural dependiendo de la frecuencia.

## AGRADECIMIENTOS

Financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación, proyecto TEC2012-37945-C01.

## REFERENCIAS

[1] G. M. Olson and J. S. Olson, “Distance matters”, Human-Computer Interaction, Volume 15, pp. 139-178, Lawrence Erlbaym Associates Inc, 2000.

[2] J. Sussman, J. E. Christensen, S. Levy, W. E. Bennett, T. V. Wolf, T. Erickson and W. A. Kellogg, "Rendezvous: Designing a VoIP conference call system", UIST, 2006.

[3] S. Deo, M, Billinghurst, N. Adams and J. Lehikioinen, “Experiments in spatial mobile audio-conferencing”. Proc. of the 4th international conference on mobile technology applications and systems and the 1st international symposium on Computer human interaction in mobile technoloy,vol. 7, ACM Press, pp. 447-451, 2007.

[4] S. Goose, J. Riedlinger and S. Kodlahalli, “3D audio conferencing and archiving services for handheld wireless devices”, Int. Journal of Wireless and Mobile Computing, vol. 1(1), pp. 5-13, 2005

[5] R. Kilgore, M. Chignell and P. Smith, Paul, “Spatialized audioconferencing: what are the benefits?”, Proc. of the 2003 conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative research, pp. 135-144,IBM Press, 2003

[6] J. Baldis, “Effects of spatial audio on memory, comprehension, and preference during desktop conferences”, Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems, pp. 166-173, 2001

[7] B. Shinn-Cunningham, “Learning reverberation: Considerations for spatial auditory displays,” in Proceedings of the ICAD, 2000, pp. 126–134.

[8] J.J.Lopez, E. Aguilera, P. Gutierrez, “A study of the influence of auralization on speech intelligibility and immersion in multi-party teleconferencing systems using binaural audio”, EAA Forum Acusticum, Krakow, 2014.

[9] E. Aguilera, J.J.Lopez, P.Gutierrez, M. Cobos, “An immersive multi-party conferencing system for mobile devices using binaural audio”, Proc. of the AES 55th Conference on Spatial Audio, Helsinki, 2014

[10] J.J. López, M. Cobos, B. Pueo, “Elevation in wave-field Synthesis using HRTF cues”, Acta Acustica, 96 (2), pp. 340-350, 2010.

[11] D. Brungart and W. Rabinowitz, “Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions”, Journal Acoustic Society of America 106, pp 1465-1479, 1999.

[12] A. Kan, C. Jin, A. van Schaik, “A psychophysical evaluation of near-field head-related transfer functions synthesized using a distance variation function”, Acoustical Society of America, pp. 2233-2242, 2009.

[13] K. Nguyen, T. Carpentier, M. Noisternig, O. Warusfel, “Calculation of head related transfer functions in the proximity region using spherical harmonics decomposition: comparison with measurements and evaluation”, Proc. 2nd Int. Symp.

[14] M. R. Schroeder, ``Natural-sounding artificial reverberation,'' Journal of the Audio Engineering Society, vol. 10, no. 3, pp. 219-223, 1962.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DESARROLLO DE HERRAMIENTA SOFTWARE PARA LA REALIZACIÓN DE TEST DE AUDICIÓN CON RUIDO "JHINT"

PACS:43.60.Qv

Rodríguez, Josep; Ferrer, Miguel; Piñero, Gema; de Diego, María
Inst. de Telecom. Y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)
Univ. Politécnica de Valéncia (UPV)
Camino de Vera, s/n.
46022 Valencia
Tel: +34963877007, ext. 73008,
Fax: +34963877309,
E-mail: jorodsen@epsg.upv.es

**ABSTRACT**
Hearing In Noise Test (HINT) is a test that is used to calculate the intelligibility both hearing impaired and in persons with healthy hearing. The HINT test has emulated with different noises (road, Café, Random noise ...) to calculate the SNR with 50% intelligibility. 50 sentences were used and evaluated 30 individuals without hearing impairments with ages between 23 and 58, in order to obtain an average result of the SNR ("Signal to Noise Ratio") for different noises.

**RESUMEN**
Hearing In Noise Test (HINT o prueba de audición con ruido), es un test que se utiliza para calcular la inteligibilidad tanto en personas con deficiencias auditivas como en personas con la audición sana. Se ha emulado el test HINT con distintos ruidos (carretera, cafetería, ruido aleatorio…) para calcular el 50% de inteligibilidad. Se han utilizando 50 frases y evaluado a 30 individuos sin deficiencias auditivas de edades entre 23 y 58 años, con el fin de conseguir un resultado promedio de la SNR ("Signal to Noise Ratio") para los distintos ruidos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las deficiencias auditivas tratan de subsanarse mediante el empleo de audífonos o implantes cocleares que hoy en día permiten realizar funciones más complejas que la introducción de una simple ganancia, puesto que suelen incorporar pequeños procesadores capaces de realizar complejos cálculos en tiempo real. Esto permite introducir algoritmos que por ejemplo, tratan de reducir el ruido acústico o realzar la señal de voz con vistas a mejorar la inteligibilidad. Sin embargo, el desarrollo de estos algoritmos requiere herramientas de evaluación de sus prestaciones lo más objetivas posible, que a su vez sirvan para calibrar o configurar de forma óptima estos dispositivos.

En este trabajo se presenta una herramienta que sirve para calcular la SNR (Signal to Noise Ratio) que corresponde al 50% de inteligibilidad, extrapolando la metodología descrita por Nilsson (1994) [1].

Dicha herramienta se ha llamado "JHINT" y mejora el test HINT original añadiendo la posibilidad de realizar el análisis para distintos ruidos procedentes de la realidad cotidiana, ya

que, en el Hint original se utiliza sólo ruido blanco o balbuceos. Además, incorpora un Corpus español extraído del Sharvard Corpus [2].
Existen varias formas de calcular la inteligibilidad, como por ejemplo el SRT (Speech reception threshold) [3], que es un procedimiento audiométrico de discurso no invasivo que mide el grado de pérdida de la audición para el habla. El umbral de reconocimiento de voz es el nivel de audiencia más baja a la que el habla apenas puede ser reconocida o comprendida. En esta prueba, un número de palabras s*pondaic* se presentan al paciente en diferentes intensidades. Palabras *spondaic* o espondeos, son palabras que contienen dos sílabas, que están igualmente acentuadas o enfatizadas. El SRT se define como el nivel de audición más bajo a la que el encuestado repite correctamente 50% de una lista de palabras *spondaic*. Se usan los espondeos, porque son más fáciles de administrar y realizar los test, pero existe el problema de que estas palabras no simulan correctamente una conversación, y no existe naturalidad, por lo que el SRT no es el mejor método, Por este motivo la aplicación HINT que utiliza frases cotidianas es un método mas efectivo, además, en la herramienta realizada JHINT se obtiene mayor efectividad al utilizar distintos ruidos como: ruido de carretera, ruido de cafetería, ruido de estación de tren y ruido aleatorio filtrado con el espectro de la voz que reproduce las frases.

La herramienta ha sido desarrollada en una aplicación mediante *GUI* (Graphical User Interface) de MATLAB, implementando el procedimiento descrito en el test Hint y que se detallará a continuación.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL JHINT

La Prueba de Audición en Ruido (HINT) es una prueba de recepción del lenguaje estandarizado que mide el reconocimiento de frases con ruido de fondo. El HINT se compone de 250 frases, que se clasifican en 25 listas. Las oraciones para el HINT son una adaptación de 336 frases [4].
El HINT es un mecanismo para el reconocimiento de voz adaptativo. En otras palabras, el nivel de cada ruido se ajusta basándose en la respuesta del oyente. El nivel de presentación del ruido aumenta después de cada respuesta correcta, lo que eleva el nivel de dificultad de la siguiente frase de la lista. Por el contrario, el nivel de presentación del ruido se disminuye después de cada respuesta incorrecta, lo que reduce la dificultad para la siguiente frase. El nivel de reproducción de las frases se mantiene constante, por lo que adaptando el nivel de presentación del ruido varía la relación de señal a ruido (SNR).
Para determinar si una respuesta es correcta o incorrecta, al encuestado escucha una frase, y este debe repetir lo que ha escuchado. El HINT especifica que para determinar que una frase es entendida correctamente, el encuestado debe acertar el 100% de sus palabras, pudiendo errar los artículos y en los tiempos verbales.

Hay que tener en cuenta que las frases HINT también se pueden administrar sin ruido para evaluar el reconocimiento de las frases en silencio. En este caso, se obtiene un umbral para el reconocimiento de frases. Si se realiza la prueba con el ruido, la adaptación de la SNR permite la estimación de un umbral de SNR para el reconocimiento del habla en presencia de ruido. Cuando el valor de la relación SNR disminuye, las condiciones de escucha se vuelven más difíciles.

La herramienta desarrollada tiene un entorno amigable. Cuenta con una página principal, donde se escoge la opción de empezar el test, o analizar frases, ruidos u otros test, además se ha añadido un mecanismo de control, para detectar outliers, (encuestados a los que descartaremos para realizar los test) al empezar los tests, para lo que se ha añadido un enlace en la página principal del programa que abre otra aplicación, esta permite realizar un simple test de audiometría entre las frecuencias 125 Hz y 8 KHz (decisión tomada tras el análisis de varias normas, como las UNE EN ISO 389 parte 1-2-3-4-5-6-7).. Además existe la posibilidad de guardar el grafico con el umbral auditivo para su análisis posterior.
Para detectar outliers se ha seguido el criterio de la OMS (Organización Mundial de la Salud) (pérdida superior a 40 dB en el peor oído). Ninguno de los 30 encuestados manifestaron pérdidas superiores a dicho nivel, por lo que no se ha tenido que desestimar a ninguno de ellos.

Una vez realizada la audiometría, tenemos la posibilidad de avanzar a la siguiente fase (Figura 1), donde se recogen los datos de los usuarios a analizar: nombre, apellidos, fecha de nacimiento y fecha de realización del test.

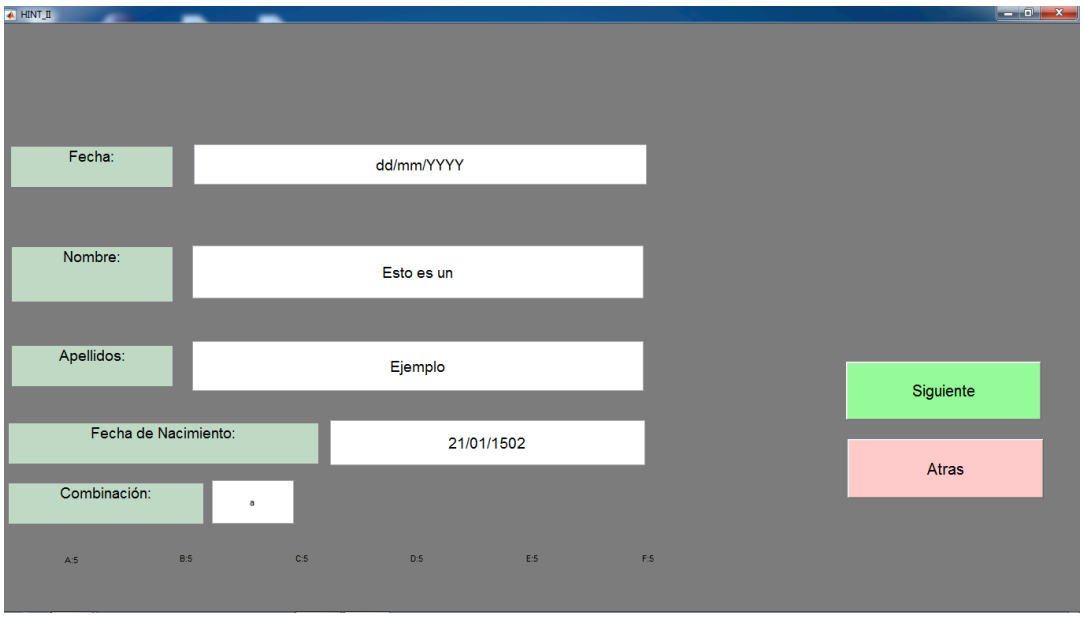



**Figura 1:** Pagina 2 del JHINT

Se han utilizado 5 listas de 10 frases cada una, obtenidas del Sharvard Corpus [2] que serán reproducidas aleatoriamente por una voz masculina o por una voz femenina con un nivel de $64dB_{SPL}$.
El procedimiento que se utiliza en la herramienta desarrollada es el mismo que para el HINT.
Se ha decidido fijar una SNR inicial de 5 dB, debido a que es preferible empezar con una SNR favorable para el encuestado. Por lo tanto cuando empiece el test se reproducirá una frase con un ruido de fondo (de entre los ruidos considerados) y con una SNR de 5 dB. Seguidamente, la segunda, tercera y cuarta frases serán reproducidas incrementando o decrementando (dependiendo de si el usuario entiende correctamente o no dicha frase) su SNR en 4dB. Para la quinta, sexta, séptima y octava frase se aplicará un incremento o decremento de 2dB y finalmente para la novena y décima frase la variación de la SNR será de ±1dB, consiguiendo un resultado final con mayor precisión.

En la figura 2 se visualiza el entorno realizado con *Matlab* de la aplicación JHINT, donde se realiza el procesado descrito anteriormente, el funcionamiento es el siguiente, primero se selecciona el tipo de ruido, seguidamente se selecciona la lista de frases y el genero de la voz que las va a reproducir, con los parámetros seleccionados, se pulsa el botón de ***empieza***, este empezara a reproducir la frase, el encuestador debe juzgar leyendo la frase en pantalla si el encuestado acierta o no la misma. En caso de acertar se deberá pulsar ***entiende***, y en caso de fallar, se pulsara ***no entiende.***

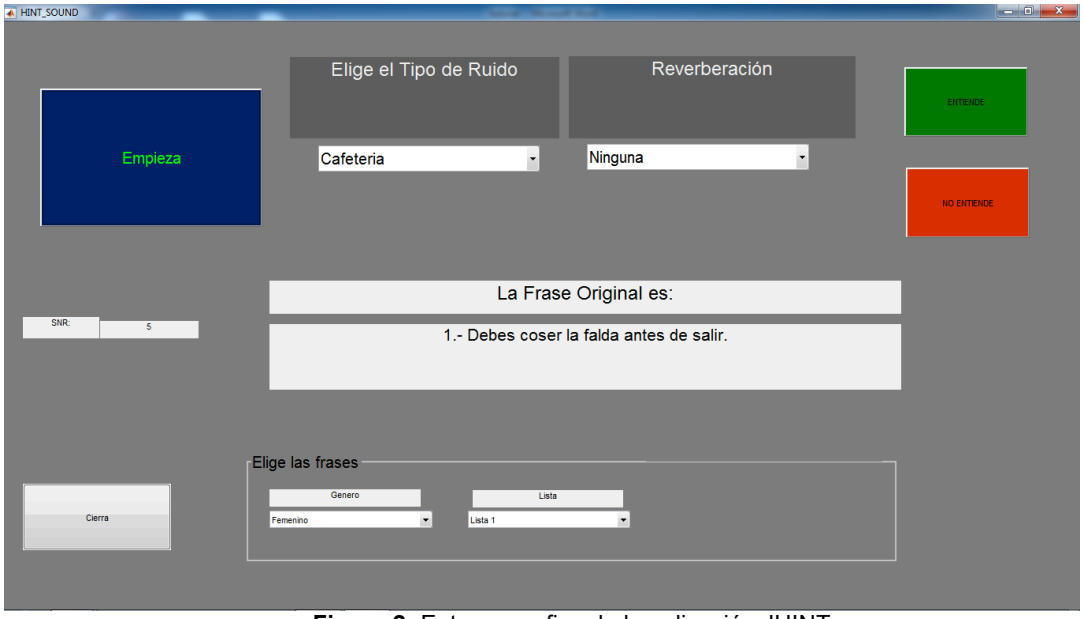



**Figura 2:** Entorno grafico de la aplicación JHINT

Paralelamente, como vemos en la figura 3, se ha desarrollado una herramienta de análisis de los distintos tests con las siguientes prestaciones: tras abrir el test que queremos analizar, y seleccionar el ruido y la frase que queremos ver, aparece la SNR final, La SNR de la frase, La SNR vs Nº de frase, un análisis temporal, un análisis espectral, el espectrograma, la evolución temporal de la SNR, y además se puede visualizar la evolución de la potencia con el tiempo tanto para la frase como para el ruido, incluyendo la posibilidad de visualizar el audiograma realizado al usuario al que se está analizando. La herramienta permite modificar varios parámetros para el análisis como el número de puntos de la fft (*Fast Fourier Transform*).

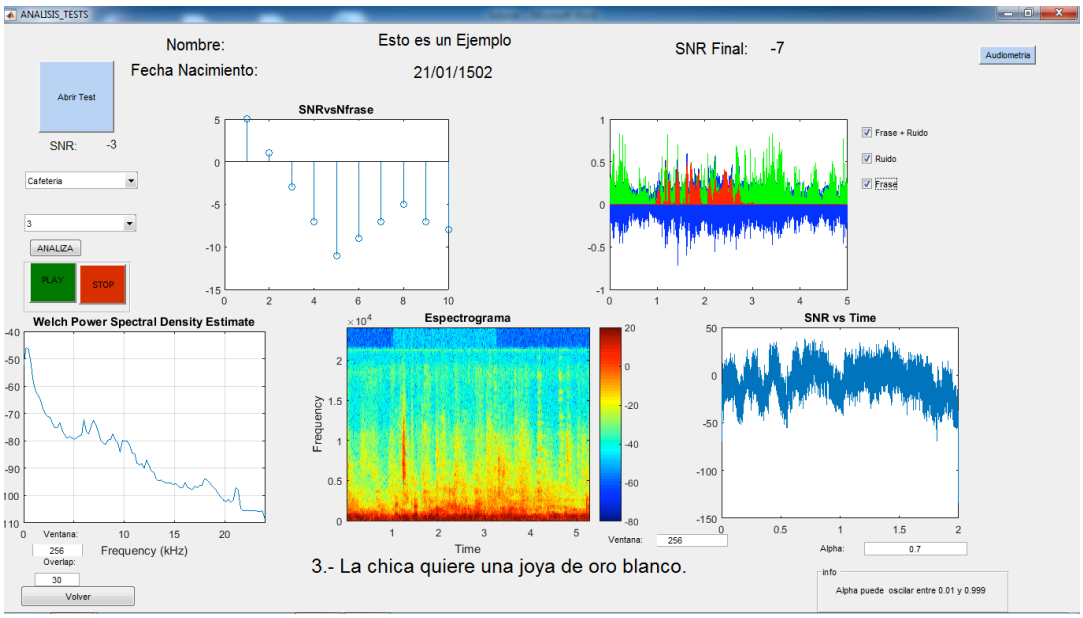



**Figura 3: Herramienta de análisis JHINT**

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN JHINT

La realización de estos test pretende obtener unos resultados específicos del nivel de SNR que proporcionaría el 50% de inteligibilidad para los distintos ruidos preseleccionados. Se espera, que los resultados se ajusten en función de la naturaleza de cada ruido. La aplicación JHINT se ha usado en una muestra formada por 30 individuos, con el fin de conseguir una SNR promedio para los distintos ruidos. Además para el ruido de cafetería se ha decidido procesar el mensaje para añadir una reverberación, teniendo para este ruido tres posibilidades: ruido de cafetería sin reverberación, con reverberación alta (TR60=0.7s) y con reverberación baja (TR60=0.2s). Para no saturar a los encuestados se ha decidido realizar 3 tests por usuario, por lo que al final de las pruebas tendremos 90 encuestas. Aleatoriamente se han asignados distintas combinaciones, con el fin de conseguir un mínimo de 10 tests realizados con los ruidos, sin tener que repetir el ruido de cafetería con las distintas reverberaciones a ningún usuario.

En la tabla 3 podemos observar los resultados obtenidos

**Resumen Estadístico para el valor de SNR buscado para cada ruido analizado.**

| *Ruidos* | *Recuento* | *Promedio* | *Mediana* | *Moda* | *Varianza* | *Desviación Estándar* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 'Cafetería Ra' | 10 | -2,8 | -3,0 | -3,0 | 4,8444 | 2,201 |
| 'Cafetería Rm' | 10 | -2,8 | -3,0 | -3,0 | 27,956 | 5,2873 |
| 'Cafetería' | 10 | -5,4 | -5,0 | -5,0 | 5,1556 | 2,2706 |
| 'Carretera' | 20 | -7,4 | -7,0 | -5,0 | 12,042 | 3,4702 |
| 'Estación de tren' | 20 | -6,9 | -7,0 | -9,0 | 9,0421 | 3,007 |
| 'Ruido aleatorio espectro F' | 13 | -1,6154 | -1,0 | -1,0 | 7,5897 | 2,7549 |
| 'Ruido aleatorio espectro M' | 7 | -3,8571 | -5,0 | -5,0 | 2,4762 | 1,5736 |

**Tabla 1 Resumen estadístico**

Para el ruido de cafetería con una reverberación alta se han realizado 10 test, obteniendo una SNR promedio de -2,8 dB, el valor de la mediana es de -3 dB y la Moda es de -3dB.Puesto que existe una desviación estándar de sólo de 2,20 (considerando los 10 encuestados) consideramos que este resultado es un indicativo de que la SNR promedio es fiable.

Si observamos los resultados del ruido de cafetería con reverberación media, obtenemos unos resultados similares: una SNR de -2,8 dB y una moda de -3 dB, sin embargo la desviación típica es de 5,28. Esto es debido a que un sujeto dista mucho de los demás encuestados, por lo que se ha decidido descartar el resultado del sujeto en cuestión y realizar el mismo test a otro usuario. con lo que obtenemos el siguiente resultado: una SNR promedio de -4,4dB y una desviación estándar de 2,11.

**Resumen Estadístico para el valor de SNR buscado para cada ruido analizado.**

| *Ruidos* | *Recuento* | *Promedio* | *Mediana* | *Moda* | *Varianza* | *Desviación Estándar* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 'Cafetería Ra' | 10 | -2,8 | -3,0 | -3,0 | 4,8444 | 2,201 |
| 'Cafetería Rm' | 10 | -4,4 | -4,0 | -3,0 | 4,4889 | 2,1187 |
| 'Cafetería' | 10 | -5,4 | -5,0 | -5,0 | 5,1556 | 2,2706 |
| 'Carretera' | 20 | -7,4 | -7,0 | -5,0 | 12,042 | 3,4702 |
| 'Estación de tren' | 20 | -6,9 | -7,0 | -9,0 | 9,0421 | 3,007 |
| 'Ruido aleatorio espectro F' | 13 | -1,6154 | -1,0 | -1,0 | 7,5897 | 2,7549 |
| 'Ruido aleatorio espectro M' | 7 | -3,8571 | -5,0 | -5,0 | 2,4762 | 1,5736 |

**Tabla 2 Resumen estadístico**

Para el ruido de cafetería sin reverberación, con 10 encuestados tenemos los siguientes resultados: promedio:-5,4dB, moda de:-5 dB y desviación estándar:2,27.
Con el ruido de carretera, se han encuestado a 20 usuarios, y la SNR promedio es de -7,4 dB, con una moda de -5 dB y una desviación típica de 3,47.
Observando los resultados para el ruido de estación de tren, con 20 encuestados, existe una SNR promedio de -6,9, la moda es de -9 y la desviación estándar de 3,00.
Para el Ruido de espectro ensanchado filtrado con el espectro de la voz de la mujer, la SNR promedio es de -1,61dB, con una moda de -1dB, y una desviación estándar de 2,75.
Y para el Ruido de espectro ensanchado filtrado con el espectro de la voz del hombre, la SNR promedio es de -3,85 y una desviación estándar de 1,57.
Como era de esperar los ruidos que fueron procesados con cierto nivel de reverberación, son los que necesitan una SNR mayor, además del de ruido de espectro ensanchado Estos son los ruidos que los usuarios encuestados han encontrado mayor dificultad a la hora de entender el mensaje.

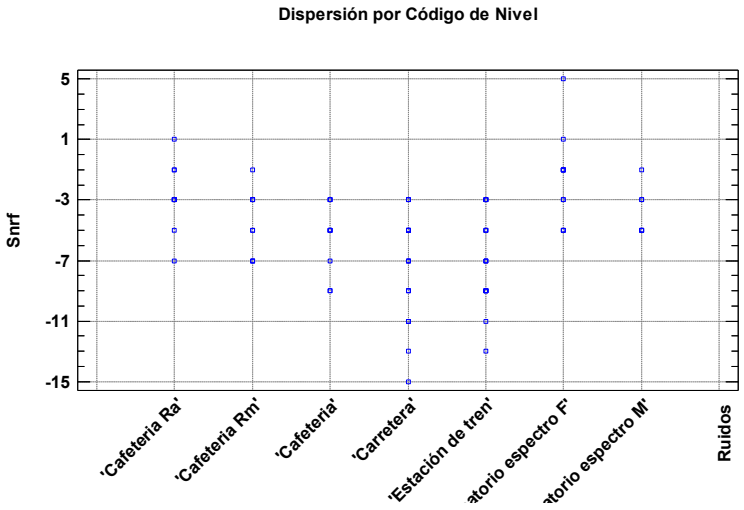



**Figura 4: Dispersión por ruido**

En la figura 4 podemos observar la dispersión para cada ruido. Se observa que para el ruido de carretera tenemos una mayor dispersión, ya que la presencia de este ruido ha originado en los encuestados más dudas.
Si observamos la figura 5, se puede observar que para el ruido de carretera existe una desviación mayor, aunque el resultado final es estable, sin embargo para el ruido de cafetería con reverberación alta existe una muestra que está muy alejada del promedio, al igual que pasa con el ruido aleatorio con espectro femenino, donde también existe una muestra con SNR final que es igual a 5, estando muy desplazada del promedio.

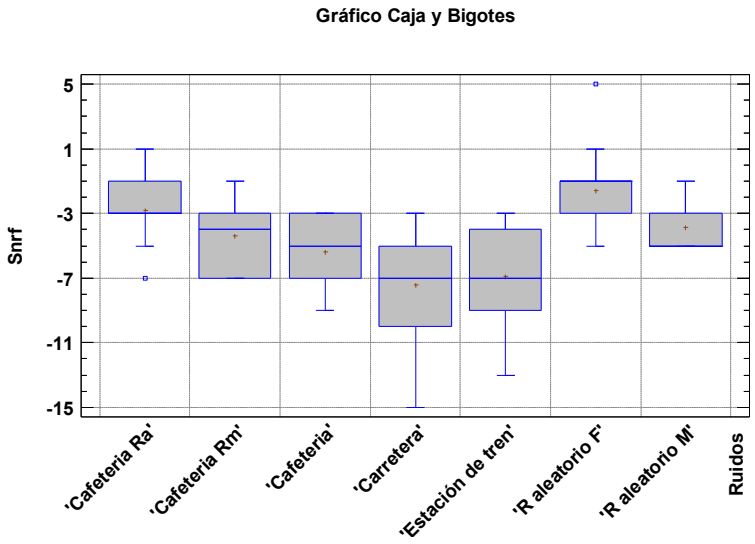



**Figura 5: Grafico de cajas y bigotes**

## 4. CONCLUSIONES, APLICACIONES Y POSIBLES MEJORAS

Tras haber estudiado diversos procedimientos para calcular la inteligibilidad mediante percepción del habla, se ha decidido realizar una herramienta que permite calcular el nivel de SNR para conseguir el 50 % de inteligibilidad. Esta herramienta permite evaluar la inteligibilidad no sólo utilizando ruido blanco como señal interferente tal y como se describe en [1], sino empleando ruidos procedentes de la realidad cotidiana. Como se preveía, el nivel de SNR obtenido varía en función de la naturaleza del ruido (por ejemplo, necesitamos mayor SNR para obtener la misma inteligibilidad, conforme los ruidos son mas aleatorios o para las frases con mayor reverberación).
Además si comparamos los resultados con los obtenidos por *Nilsson 1994 [1] (*donde se usaron ruido blanco y balbuceo de gente*),* comprobamos que para el caso del ruido aleatorio obtenemos unos resultados similares, por lo que queda contrastada la validez de la metodología utilizada.
Podemos afirmar que los valores de SNR obtenidos para los distintos ruidos considerados son fiables, puesto que la dispersión obtenida tras realizar el estudio estadístico proporciona una varianza dentro de unos límites tolerables.

La herramienta descrita podría ser utilizada con otros ruidos cotidianos que fueran de interés.
Por otra parte una posible aplicación de esta caracterización de la inteligibilidad afectada por ruidos de diferente naturaleza, nos serviría para mejorar las prestaciones de los audífonos, facilitando el día a día a las personas con deficiencias auditivas.

Además, esta herramienta permitirá configurar adecuadamente los audífonos, ya que puede emplearse en los usuarios de estos dispositivos (por ejemplo, podemos encontrar la mejor configuración de un audífono realizando el test a la persona que lo utiliza, con distintas configuraciones y encontrando cual es la que proporciona una mejor inteligibilidad o una SNR más baja). Por tanto, a través del análisis de los resultados para las diferentes configuraciones de los audífonos obtenidos mediante esta aplicación se podrían evaluar las mejoras en el procesado de dichos audífonos.

Otra de posibilidades que ofrece la aplicación sería tratar de emular el test que realiza *Lena L.N. Wong 2012,* [5] donde se caracteriza la inteligibilidad para distintos ruidos pero de forma más rigurosa, buscando otras cotas de inteligibilidad como el 20%, 40% u 80% aunque particularizado con la lengua China cantonesa. En nuestro caso partiendo de la SNR obtenida para el 50% de inteligibilidad se podrían extrapolar estos estudios pero, utilizando el corpus español.

En la misma línea, tratando de mejorar la inteligibilidad se puede ajustar el test que se ha diseñado pero usando otras configuraciones de forma que nos permita analizar la inteligibilidad de los encuestados, considerando palabra a palabra y no con frases completas. Para esto, basándonos en [5] se deberá realizar una lista con frases perfectamente balanceadas, otras donde predominen las palabras sordas y otras donde predominen las palabras sonoras. Si se analizan todos los parámetros se podrá caracterizar con mayor precisión la inteligibilidad, y así intentar buscar en función de la naturaleza del ruido, una configuración genérica (procesado a realizar en los audífonos) que optimice la capacidad de entendimiento.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea FEDER y el Gobierno español a través del proyecto TEC2012-38142-C04, y la Generalitat Valenciana a través del proyecto PROMETEOII/2014/003 y la ayuda FPA/2015/032.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Nilsson, M., Soli, S.D., & Sullivan, J.A. (1994). Development of the hearing in noise test for the measurement of speech reception thresholds in quiet and noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95(2), 1085-1099

[2] Aubanel,V., Lecumberri, M.L.G., Cooke, M. "The sharvard corpus: A phonemically-balanced Spanish sentence resource for audiology" International Journal of Audiology Volume 53, Issue 9, September 2014, 633-638

[3] ANSI. (1997) *S3.5 American National Standard Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index*. (Acoustical Society of America, New York)

[4] Bamford-Kowal-Bank (BKB) (Bench y Bamford, 1979)

[5] Lena L.N. Wong, Elaine H.N.Ng "Characterization of speech understanding in various types of noise" (J.Acoustical Society of America 2012)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CON ACCESIBILIDAD RESTRINGIDA MEDIANTE MODELOS SEA

PACS: 43.40.+s; 44.05+e; 45.10.Db

Chimeno Manguán, Marcos[1]; Fernández de las Heras, María José[2]; Roibás Millán, Elena[3]; Simón Hidalgo, Francisco[2]

[1]Universidad Politécnica de Madrid, ETSIAE. Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid. Tlf.: +34 91 336 63 67
e-mail: marcos.chimeno@upm.es

[2]Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ITEFI. C/ Serrano 144, 28006 Madrid. Tlf.: +34 91 561 88 06
e-mail: f.simon@csic.es

[3]Universidad Politécnica de Madrid, IDR/UPM. Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid. Tlf.: +34 91 336 63 53
e-mail: elena.roibas@upm.es

## ABSTRACT

The determination of the loss factors of an SEA model is usually based on analysing experimentally the power balance of the structure considered. The increasing size and complexity of current structures rises practical problems to measure it experimentally. The presence of sub-structures that cannot be excited adequately or at all, as well as the presence of structures not accessible (and therefore whose response cannot be measured), pose applicability limits to the usual method, the Power Injection Method. This work presents the application of new methods for this type of systems using an L-shaped structures composed of three subsystems.

## RESUMEN

La determinación de los coeficientes de pérdidas de un modelo SEA se basa comúnmente en el análisis experimental del balance de potencias de la estructura analizada. La configuración y elevada complejidad de las estructuras actuales añade problemas de carácter práctico a la hora de realizar esta medida experimental. La existencia de subestructuras que no pueden excitarse adecuadamente o en absoluto, así como la presencia de subestructuras inaccesibles cuya respuesta no puede medirse, impide la aplicación directa del método habitual, el Método de Inyección de Potencia. Este trabajo presenta la aplicación de nuevos métodos para este tipo de sistemas sobre una estructura sencilla en forma de L compuesta de tres subsistemas.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de una estructura en el rango de alta frecuencia se puede afrontar mediante un modelo de Análisis Estadístico de la Energía o SEA (Statistical Energy Analysis) [1] que estudia la respuesta del sistema estudiando un conjunto de subsistemas y el intercambio de potencia entre estos. La definición de un modelo SEA pasa por tanto por la definición de los factores de pérdidas internos (relacionados con la disipación en el propio subsistema) y la definición de los factores de pérdidas de acoplo (relacionados con la transmisión de energía entre subsistemas). Aunque existen aproximaciones analíticas [1] o numéricas [2] para estos factores, la elevada

complejidad de las estructuras actuales ha hecho que sea predominante la determinación experimental.

La primera propuesta para determinar los factores de pérdidas a partir de medidas experimentales del balance energético fue propuesta por Bies & Hamid dando lugar al denominado Método de Inyección de Potencia [3] a partir del cual han evolucionado diferentes propuestas posteriores centradas en la resolución de problemas de carácter numérico [4,5].

El Método de Inyección de Potencia se basa en el análisis conjunto de varios estados de equilibrio energético para obtener un sistema algebraico determinado. Para un conjunto de *n* subsistemas, su equilibrio viene determinado por $n^2$ coeficientes de pérdidas mientras que la teoría SEA determina únicamente *n* ecuaciones de equilibrio (una por cada subsistema). Combinando *n* equilibrios independientes es posible obtener el sistema de $n^2$ ecuaciones. El método más habitual para asegurar la independencia de los equilibrio energéticos es realizar una excitación sucesiva de cada subsistema.

Esta aproximación al problema hace necesario excitar todos y cada uno de los subsistemas que se consideren así como medir la energía en cada uno de ellos. Esta restricción puede ser importante para sistemas grandes o complejos en los que pueden encontrase problemas de accesibilidad [6]. Para afrontar esta limitación se han propuesto algunas formulaciones alternativas como son el método de los Coeficientes de Potencia [7] - que solo requiere medir la respuesta de los elementos del sistema a las cargas externas sin medida explícita de la carga - o formulaciones basadas en transmisibilidades [8], que tampoco requieren conocer la potencia inyectada pero sí los coeficientes de pérdidas internas o los totales.

Para los sistemas que no cumplen los requisitos impuestos por el Método de Inyección de Potencia, es decir, sistemas en los que no todos los elementos pueden excitarse o bien no puede medirse su respuesta, este trabajo presenta dos nuevos métodos para la determinación de los coeficientes de pérdidas.

El trabajo presenta en primer lugar la formulación de los nuevos métodos partiendo del equilibrio de potencias SEA y el Método de Inyección de Potencia. A continuación, se presenta un caso de aplicación compuesto de tres subsistemas que se analiza mediante los nuevos métodos propuestos para posteriormente indicar las conclusiones principales del trabajo.

## FORMULACIÓN

La teoría SEA establece el equilibrio de potencias de un sistema a partir del equilibrio de potencias de cada uno de los $n$ subsistemas en los que está dividido. De este modo, el equilibrio del subsistema $i$ en una banda centrada en $\omega$ resulta

$$P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \omega\eta_{ji}E_j = \omega\eta_{ii}E_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \omega\eta_{ij}E_i \qquad i = 1, \dots, n \tag{1}$$

El primer término de la izquierda representa la potencia inyectada en el subsistema $i$ por cargas externas mientras que el segundo término de la izquierda representa la energía transmitida desde el resto de subsistemas, expresado en términos de la energía de cada subsistema $j$, $E_j$, y los factores de acoplo desde el subsistema $j$ al $i$, $\eta_{ji}$. El primer término de la derecha representa la energía que se disipa en el propio subsistema expresada en términos de la energía del subsistema $i$, $E_i$, y su factor de pérdidas interno, $\eta_{ii}$. Por último, el segundo término de la derecha representa la energía transmitida desde el subsistema $i$ al resto de subsistemas.

El balance de potencias del sistema completo puede expresarse de forma matricial a través de la matriz SEA, $\boldsymbol{L}$, compuesta de los diferentes factores de pérdidas, como

$$\widehat{\boldsymbol{P}} = \omega \boldsymbol{L} \widehat{\boldsymbol{E}} \tag{2}$$

**Método de Inyección de potencia**

El Método de Inyección de Potencia se basa, como se ha indicado anteriormente, en extender la ecuación de equilibrio SEA para representar varios estados de equilibrio independientes. De este modo la Ecuación (2) se extiende mediante algebra matricial para representar todos los estados de equilibrio:

$$\boldsymbol{P} = \omega \boldsymbol{L} \boldsymbol{E} \tag{3}$$

En la que $\boldsymbol{P}$ y $\boldsymbol{E}$ son matrices que contienen en cada columna las potencias inyectadas y las energías de cada uno de los subsistemas, para cada uno de los estados de equilibrio correspondientes.

**Sistemas con restricción de excitación o medida de la respuesta**

En sistemas grandes o complejos pueden encontrarse elementos con poca accesibilidad, como elementos internos en estructuras espaciales o capas de aire en paredes dobles, siendo difícil o imposible la adecuada excitación de los mismos o la medida de su respuesta a una excitación externa. En estos casos debe por tanto distinguirse, según el carácter de los subsistemas, entre los $n_e$ subsistemas que pueden ser excitados adecuadamente y los $n_m$ subsistemas cuya respuesta puede medirse. Esta clasificación permite analizar la ecuación (3) en función del grado de excitación y medida del sistema.

En el caso de que no se pueda medir la respuesta de todos los subsistemas ($n_m < n$) pero sí puedan ser excitados adecuadamente todos ellos ($n_e = n_m$), entonces puede aplicarse el Método de Inyección de Potencia a un sistema menor, de tamaño $n_m \times n_m$, que permitiría obtener un conjunto de factores de pérdidas efectivas [9]. Por su interés, este trabajo se centra en el que, pudiéndose medir la respuesta en todos los subsistemas considerados, alguno de ellos presente problemas para ser excitado adecuadamente, resultando $n_e < n$.

En una situación de excitación parcial, $n_e < n$, las matrices $\boldsymbol{P}$ y $\boldsymbol{E}$ – ecuación (3) – son de tamaño $n_m \times n_e$ por lo que no puede obtenerse la matriz SEA del sistema y de ella determinar los factores de pérdidas del sistema. Para este caso se presentan dos métodos basados en dos principios distintos que permiten afrontar el problema en diferentes grados de complejidad.

**Método Basado en Minimización del Error**

El primer método propuesto se basa en minimizar el error de la ecuación (3) a través de un funcional que evalúa la norma euclídea

$$\boldsymbol{J_1} = \|\boldsymbol{P} - \omega \boldsymbol{L} \boldsymbol{E}\| \tag{4}$$

Este método permite además tener en cuenta propiedades conocidas del sistema para delimitar el espacio de soluciones, por ejemplo igualdad de factores de pérdidas internas para elementos idénticos o factores de acoplo nulos en subsistemas no interconectados.

**Método Basado en la Actualización de Modelos**

En sistemas complejos es habitual desarrollar modelos previos, $\boldsymbol{L}_M$, a partir de análisis preliminares para la predicción de su comportamiento. El segundo método propuesto se basa en las técnicas de actualización de modelos para determinar un modelo más preciso que minimiza el funcional

$$\boldsymbol{J_2} = \|\boldsymbol{L} - \boldsymbol{L}_M\| \tag{5}$$

sujeto a los equilibrios energéticos medidos, ecuación (3).

El método de los multiplicadores de Lagrange permite determinar para este caso una ley de actualización del modelo

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{L_M} + \frac{1}{\omega}(\boldsymbol{P} - \omega \boldsymbol{L_M E})(\boldsymbol{E}^T \boldsymbol{E})^{-1} \boldsymbol{E}^T \quad (6)$$

que permite mejorar el modelo inicial en base a los resultados experimentales.

## APLICACIÓN

### Descripción del Sistema

Esta sección presenta la aplicación de los dos métodos propuestos a un sistema real compuesto de una estructura en forma de L formada por dos paneles sándwich inmersa en una cámara reverberante. La estructura se estudió dentro del proyecto "Random Derivation by Vibro-Acoustic Simulation (RANDERIV) [10] realizándose un ensayo para aplicar el Método de Inyección de Potencia considerando tres subsistemas: los dos paneles y el aire de la cámara reverberante [11].

El panel de mayores dimensiones, panel A, se considera el subsistema SEA 1 y consiste en un panel de 1.4 x 0.7 m construido con una estructura de sándwich compuesta de un núcleo de nido de abeja de aluminio de 35 mm de espesor y dos pieles también de aluminio con un espesor de 0.5 mm. El panel de menor tamaño, panel E, se considera el subsistema SEA 2 y está construido también mediante una estructura sándwich de aluminio de 23 mm de espesor el núcleo y 1 mm cada piel. El tamaño del panel E es de 0.65 x 0.65 m. Ambos paneles están unidos mediante dos uniones puntuales realizadas mediante perfiles de aluminio 2024-T3511en L.

La estructura se estudió en las instalaciones del Instituto de Tecnologías Física y de la Información del CSIC, más concretamente en su cámara reverberante que cuenta con un volumen de 200 $m^3$. La Figura 1 muestra un esquema de la estructura y de la cámara reverberante.

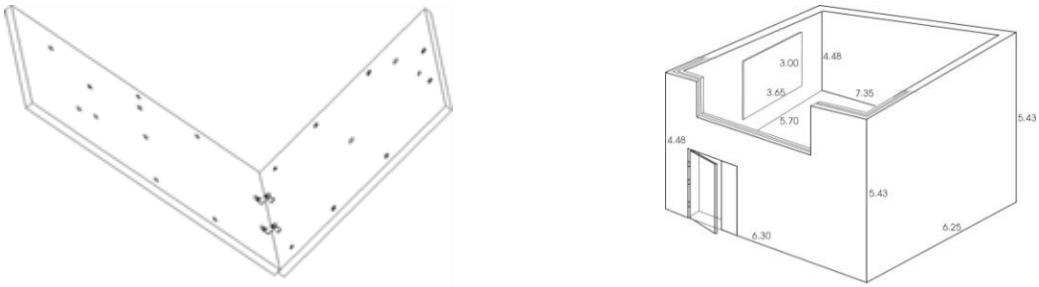



Figura 1. Elementos estructurales que componen los subsistemas 1 y 2 (izquierda) y cámara reverberante (derecha).

### Descripción del Ensayo

El ensayo realizado sobre el sistema consistió en la aplicación del Método de Inyección mediante excitación sucesiva de los tres subsistemas. Para los subsistemas estructurales se realizó una excitación estructural mediante un vibrador electromagnético (LDS450**)** en tres localizaciones distintas como aproximación a una excitación sin contacto. Para el caso del

subsistema 3, la cámara reverberante, se realizó la excitación del mismo mediante un campo acústico difuso basado en un ruido blanco generado mediante un conjunto de altavoces y los difusores adecuados. La potencia inyectada en los subsistemas 1 y 2 se determinó mediante la fuerza y aceleración registradas en cada uno de los puntos de excitación correspondientes que se muestran en la Figura 2.

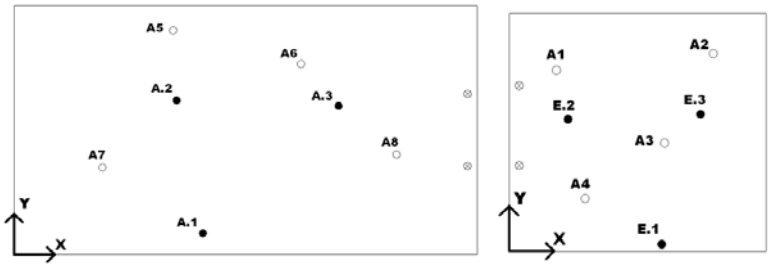



Figura 2. Puntos de excitación (●) y de medida (○) del panel A, subsistema 1, (izquierda) y del panel E, subsistema 2 (derecha)

Tanto la excitación como la respuesta del subsistema 3 (la cámara reverberante) se realizó mediante 4 micrófonos de control distribuidos alrededor de la estructura para determinar el valor promedio de presión en el aire.

**Caso de Estudio**

La estructura en estudio no presenta los problemas de accesibilidad descritos en la Introducción, lo que permite la aplicación directa del Método de Inyección de Potencia. Los resultados obtenidos de su aplicación se consideran los valores de referencia para estudiar los resultados obtenidos con los nuevos métodos propuestos. Para este trabajo se considerará que el panel E (subsistema 2) presenta problemas de accesibilidad que impiden su excitación estructural directa por lo que en este caso el número de subsistemas es $n = 3$, el número de subsistemas cuya respuesta se mide es $n_m = 3$, mientras que el número de subsistemas que se excitan es $n_e = 2$ (los subsistemas 1 y 3).

Se consideran los factores de pérdidas determinados mediante: a) la aplicación directa del Método de Inyección de Potencia considerando 3 excitaciones, b) el método basado en minimización del error en el equilibrio del sistema considerando 2 excitaciones y c) el segundo método tomando como modelo previo que actualizar, $\boldsymbol{L}_M$, los resultados obtenidos con el método anterior. Los resultados en los tres casos se muestran en la Figura 3.

En primer lugar, los resultados obtenidos mediante la aplicación del Método de Inyección de Potencia presentan características especiales por encima de la banda de 4000 Hz (inclusive) obteniendo resultados con valor negativo para algunos valores de factores de pérdidas internas como $\eta_{11}$ y $\eta_{22}$. Este resultado viene determinado por el mal condicionamiento del problema en estas bandas, ya que el número de condición de la matriz de energías $\boldsymbol{E}$ aumenta drásticamente al subir en frecuencia. Como se verá en resultados posteriores, el análisis de estas bandas debe considerarse por separado de las bandas inferiores.

Respecto a los resultados obtenidos mediante la minimización del error en el equilibrio energético, se obtienen muy buenos resultados para los factores de pérdidas internos de los subsistemas excitados ($\eta_{11}$ y $\eta_{33}$), así como para los factores de acoplo asociados a la transmisión de energía entre los subsistemas excitados ($\eta_{13}$ y $\eta_{31}$). Los resultados muestran así mismo que se obtiene buenos resultados cualitativos en los factores de acoplo relacionados con la transmisión de energía desde los subsistemas excitados hacia el no excitado ($\eta_{12}$ y $\eta_{32}$) así como en los asociados con la energía del subsistema no excitado ($\eta_{21}$, $\eta_{22}$ y $\eta_{23}$) dando lugar en algunas bandas a valores negativos de los mismos (no representados en la escala logarítmica de la Figura 3).

Los resultados muestran que el segundo método permite mejorar los resultados obtenidos en los factores de acoplo, especialmente en los asociados con la emisión de energía desde los subsistemas excitados como se observa por ejemplo para el factor de acoplo $\eta_{12}$.

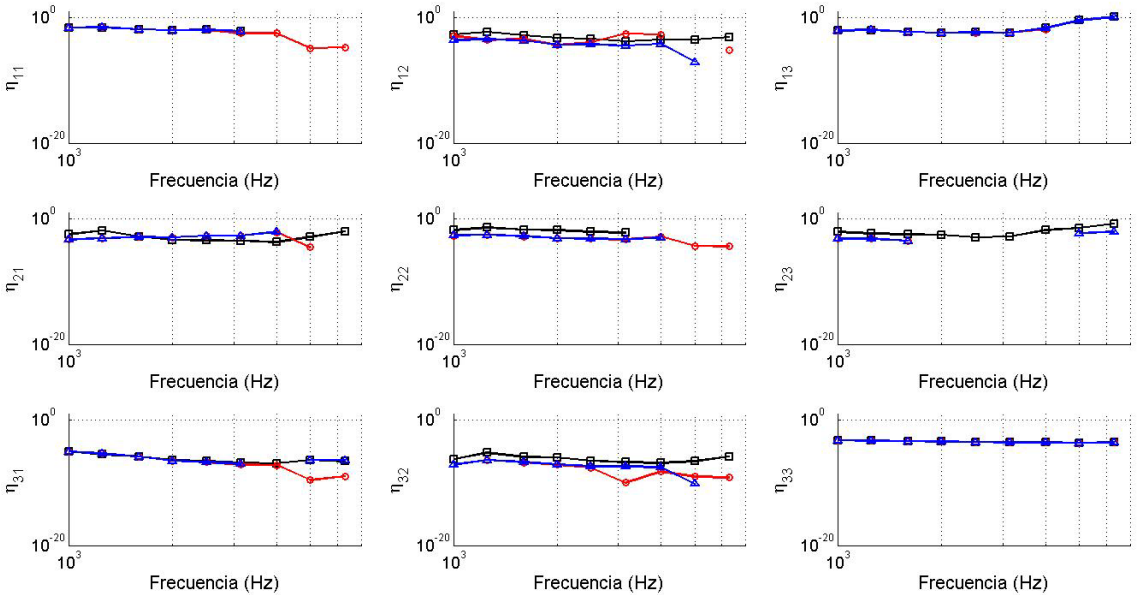



Figura 3: Factores de pérdidas del sistema determinados mediante el Método de Inyección de potencia (**-□-**) y minimizando $J_1$ sin considerar excitación en el subsistema 2 (**-o-**) y mediante actualización de este modelo minimizando $J_2$ sin considerar excitación en el subsistema 2 (**-△-**)

**Fiabilidad**

Esta sección presenta un estudio sobre la fiabilidad de los métodos propuestos basada en el análisis de la dispersión de los resultados para una incertidumbre en el estado energético del sistema. La población de la simulación de Monte Carlo (3000 casos) se ha construido a partir de una distribución normal de la matriz de energía con una desviación estándar del 5% de su valor nominal.

Las figuras 4 y 5 muestran los resultados de las figuras 4 y 5 respectivamente sobre la simulación de Monte Carlo.

La simulación de Monte Carlo muestra que el primer método está caracterizado por una mayor incertidumbre que el segundo, incrementándose esta con la frecuencia, especialmente como se indica más arriba en las últimas bandas de frecuencia consideradas ($f \geq 4000$ Hz). En las últimas bandas la simulación de Monte Carlo permite estimar el valor de aquellos factores de pérdidas con valor negativo al aplicar el primer método, como por ejemplo de $\eta_{12}$ en la banda de 5 kHz.

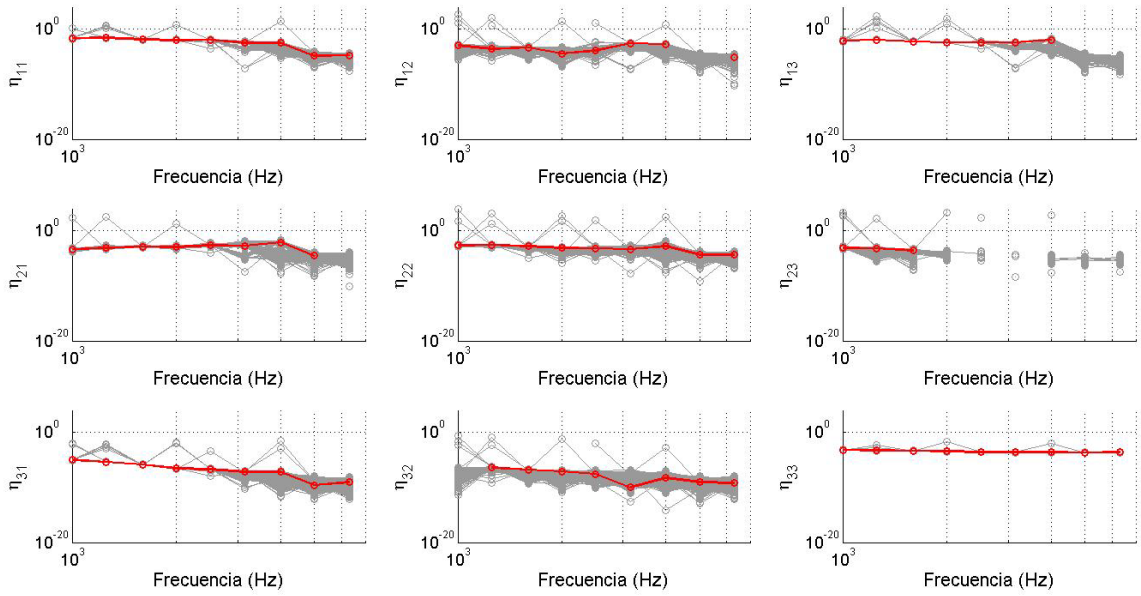



Figura 4: Incertidumbre del método basado en el funcional $J_1$: Resultado del método (**-o-**) y resultado de la simulación de Monte Carlo (**-o-)**

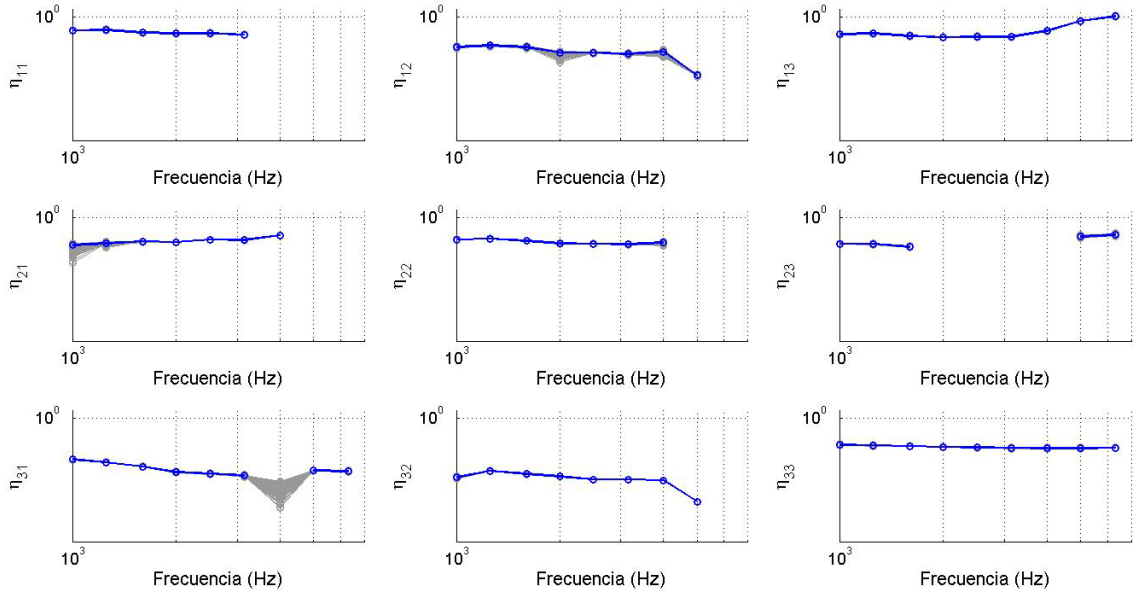



Figura 5: Incertidumbre del método basado en el funcional $J_2$: Resultado del método (**-o-**) y resultado de la simulación de Monte Carlo (**-o-).**

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la aplicación de dos métodos para la determinación de los factores de pérdidas de un modelos SEA cuando la accesibilidad restringida puede suponer un impedimento para la aplicación de otros métodos basados en el Método de Inyección de Potencia. Se han presentado estos dos métodos, que permiten afrontar estas situaciones, y se han aplicado a un caso sencillo.

Los dos métodos presentados se basan en principios distintos: la minimización del error en el equilibrio energético medido y la actualización de modelos sujeta a los resultados

experimentales. Los resultados muestran que mediante los métodos propuestos pueden determinarse adecuadamente tanto los factores de pérdidas internas de los subsistemas excitados, como los factores de acoplo asociados a la emisión de energía por parte de estos. La combinación de ambos métodos permite además mejorar los resultados respecto a los factores de acoplo desde los subsistemas que no pueden excitarse.

También se ha presentado un estudio de la fiabilidad de ambos métodos. El primer método muestra que ésta es muy dependiente del condicionamiento de las matrices de coeficientes de energía [4] que caracteriza el problema. La aplicación del segundo método a través de una ley analítica de actualización del modelo permite reducir la incertidumbre general de los resultados muy notablemente. El análisis Monte Carlo de los métodos permite además estimar el valor de los factores de pérdidas en bandas especialmente problemáticas.

**REFERENCIAS**

1. R. H. Lyon, R. G. DeJong., Theory and Applications of Statistical Energy Analysis, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann Ed, 1995.
2. L. Maxit, J.L. Guyader, Estimation of SEA coupling loss factors using a dual formulation and FEM modal information, Part I: theory, Journal of Sound and Vibration 239 (5) (2001) 907-930.
3. D. Bies, S. Hamid, In situ determination of loss and coupling loss factor by the power injection method, Journal of Sound and Vibration 70 (2) (1980) 187-204.
4. N. Lalor, Practical Considerations for the Measurement of Internal and Coupling Loss Factors on Complex Structures, Technical Report ISVR no. 182, 1990
5. C. Hopkins, Experimental statistical energy analysis of coupled plates with wave conversion at the junction, Journal of Sound and Vibration 322 (2009) 155-166
6. K. Renji, M. Mahalakshmi, High frequency vibration energy transfer in a system of three plates connected at discrete points using statistical energy analysis, Journal of Sound and Vibration 296 (3) (2006) 539-553.
7. F. Fahy, An alternative to the sea coupling loss factor: rationale and method for experimental determination, Journal of Sound and Vibration 214 (2) (1998) 261267.
8. O. Guasch, A direct transmissibility formulation for experimental statistical energy analysis with no input power measurements, Journal of Sound and Vibration 330 (25) (2011) 6223-6236.
9. M. Chimeno, Vibro-acoustic analysis of spacecraft structures with thin air layers, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (2014).
10. ESA/ESTEC. Statement of Work: Random Vibration Environment Derivation by Vibro-Acoustic Simulation, 2006. Contract No. 20779/07/NL/SFe.
11. ECE-RDR-TNO-0014, CLF Test Report, Random Vibration Environment Derivation by Vibro-Acoustic Simulation, Contract No. 20779/07/NL/SFe.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DEL ACOPLO FLUIDO-ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA MODAL DE UN CAMPO ACÚSTICO

**PACS: 43.20.Tb**

Tejado Mata, Javier[1]; Simón Hidalgo, Francisco[2]
[1] Escuela Politécnica, UEM
C. Tajo s/n
Villaviciosa de Odón,
28670 Madrid, España
Tlf.: +34 912 115 611
[2] Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, CSIC
C. Serrano 144
28006 Madrid, España
Tlf.: +34 915 618 806

E-Mail: javier.tejado@uem.es[1]; f.simon@csic.es[2]

## ABSTRACT
Present theories about space modal distribution at low frequencies in a room are based on both low acoustic absorption and no coupling between the sound field and its boundaries. These models are important in the design of rooms when the acoustic aspect is to be taken into account and even essential for small rooms or the frequencies involved and the size of the room are or the same order of magnitude. If the room is made of light elements the coupling air-structure can play a role and, as a consequence sound field within the room can be noticeably changed. In this work, the coupling between sound field and structure is considered and its influence on the modal response of the room studied.

## RESUMEN
Las teorías existentes en la actualidad que explican la distribución modal en baja frecuencia en un recinto están basadas en la existencia de baja absorción acústica y la ausencia de acoplo entre el campo sonoro y las superficies límite. Estos modelos son importantes en el diseño de salas para uso acústico e imprescindibles cuando su volumen es pequeño o cuando la frecuencia y el tamaño de sala son del mismo orden. Cuando el recinto está construido con materiales ligeros, el acoplo aire-estructura empieza a jugar un papel y la respuesta del campo acústico se puede ver fuertemente modificada. En este trabajo se considera este acoplo y se estudia su influencia en la respuesta modal del recinto

## INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en el diseño de recintos, desde el punto de vista acústico, es su geometría. Ésta afecta a varios aspectos del campo acústico que se forma en su interior y, por tanto, a las prestaciones que puede ofrecer. En general se puede decir que afecta a la difusión del campo en su interior, que a su vez presenta diferentes aspectos como pueden ser la focalización del sonido, su homogeneidad espacial, zonas que producen scattering, coloración del sonido, etc. Cuando se trata de recintos de gran tamaño, la distribución espacial del sonido

y la presencia de ecos suelen ser la mayor preocupación. Sin embargo, en recintos de pequeño tamaño es la respuesta modal del recinto la que juega un papel clave en el funcionamiento del recinto desde el punto de vista acústico. En las bajas frecuencias, la relación entre el tamaño del recinto y las longitudes de onda involucradas hace que la densidad modal sea muy baja y que, además, su importancia (amplitud) pueda no ser de valor equiparable entre ellas. El resultado es que en este rango de frecuencias el comportamiento acústico está regido por modos aislados de amplitud muy diferente y situados en zonas concretas del recinto. La consecuencia desde el punto de vista acústico es que el recinto se comporta de manera heterogénea en todo su volumen con zonas en las que se percibe un mayor –o menor– nivel de presión sonora, que la propia sala puede dar preferencia a ciertos tonos –coloración– y que, además, este comportamiento depende de las posiciones del emisor y del receptor.

Dado que la física del problema hace imposible tanto la adición de modos extra en las bandas de frecuencia afectadas como la presencia de modos dominantes, las estrategias adoptadas para el diseño de recintos se basa en la selección de geometrías que favorezcan un reparto homogéneo de los modos en las bandas de frecuencia en todo el rango espectral de trabajo. Uno de los primeros trabajos que aborda este problema fue realizado por Bolt [1], en él trata de distribuir de manera lo más homogénea posible los modos del recinto, para ello utiliza la bien conocida ecuación de los modos resonantes de un recinto paralelepipédico:

$$\omega_o(n_x, n_y, n_z) = \pi c \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \qquad (1)$$

donde $n_x$, $n_y$ y $n_z$ son números enteros que indican el orden del modo, $\omega_o$ es la frecuencia angular del modo y $L_x$, $L_y$ y $L_z$ las longitudes de las tres aristas del recinto. Muchos trabajos posteriores se han basado en este trabajo y muchos diseñadores han utilizado su principal resultado: la relación entre aristas 1:1.25:1.6 como la base de sus diseños.

Otros autores [2-5] han seguido el mismo camino y han buscado criterios que permitan encontrar las proporciones del recinto que ofrezcan una distribución más homogénea de los modos en el rango espectral de trabajo. Algunos introdujeron procedimientos de optimización como [2] y [3] y otros muestran como incluso el aumento de la frecuencia no asegura una distribución homogénea de los modos naturales del recinto [5]. Todos estos procedimientos asumen formas paralelepipédicas de recinto ya que en caso contrario no se podría obtener una ecuación explícita de los modos de la sala y ninguno de los procedimientos anteriores sería viable. Cuando la sala no tiene dicha forma, se buscan recintos rectangulares que se aproximen y se admite que la respuesta del recinto será una aproximación de la solución. Otro problema añadido es que, como ya se ha mencionado, la respuesta depende de la posición emisor receptor. De acuerdo a ellas no todas los modos serán excitados y por tanto los resultados de los procedimientos anteriores pueden resultar sesgados.

Posteriormente Cox [6] propuso un método de diseño de recintos basado en la obtención de las relaciones entre aristas que ofrezcan la respuesta en frecuencia lo más plana posible para una posición de emisor y receptor dadas. De esta horma no se basa en la distribución homogénea de la base modal del recinto sino en que la respuesta en el punto de recepción sea lo menos distorsionada posible (o lo más fiel posible a la fuente). Su método propone dos modelos distintos de cálculo, uno basado en la descomposición modal del recinto:

$$p(\omega, \boldsymbol{r}) = \sum_{n=1}^{N} \frac{A_n}{\omega_n^2 - \omega^2 + jB_n} \qquad (2)$$

en la que *p* es la presión sonora en un punto dado, $\boldsymbol{r}$, $A_n$ es función de las formas modales y $B_n$ depende de la impedancia en las fronteras del recinto. n es un mero contador que incluye los modos en los tres ejes y, por tanto, está relacionado con la terna ($n_x$, $n_y$, $n_z$).

El segundo modelo que propone está basado en el método de las imágenes fuente [7], se basa en la teoría de rayos y, en general, es más rápido que el anterior.

Una vez que ha modelado el recinto mediante uno de estos métodos –él utiliza el segundo– utiliza un parámetro de coste para optimizar la respuesta del modelo en el que las longitudes de las aristas del recinto son variables y las posiciones de emisión y recepción son fijas. De este modo está optimizando las geometría del recinto para una condiciones de uso dadas. Dado que lo que se persigue es obtener una respuesta lo más plana posible, la función de coste que utiliza y debe minimizar es:

$$\chi = \sum_{j=1}^{J}\left(L_{p,j} - mf_j + b\right)^2 \quad (3)$$

siendo $L_{p,j}$ la respuesta, expresada en nivel a la frecuencia $f_j$, y $m$ y $b$ los coeficientes de la recta que mejor aproxima la respuesta.

En todos los modelos descritos anteriormente las propiedades físicas de la frontera se obvian o se limitan, en la práctica, a su absorción. Esta aproximación es suficientemente buena para la mayor parte de los casos en los que los recintos son de tamaño medio y sus paredes y forjados poseen suficiente masa. Sin embargo, para recintos pequeños con paredes ligeras el acoplo que se produce entre el recinto y la estructura que lo crea puede ser suficientemente fuerte para que la respuesta modal de la sala se vea afectada. Este inconveniente se podría subsanar en algunos casos, imponiendo en toda su frontera una impedancia adecuada que tenga en cuenta este fenómeno, sin embargo la obtención de esta magnitud no es fácil ni experimentalmente ni teóricamente. Una alternativa es crear un modelo que incluya as paredes como un elemento más del mismo, de forma que se pueda integrar en el proceso de optimización.

En este trabajo se estudia la influencia de paredes ligeras sobre la respuesta de un recinto de pequeño tamaño para evaluar su importancia y, en consecuencia la necesidad de tenerlas en cuenta en el proceso de optimización. Para ello se desarrollará un modelo de elementos finitos que incluya como subsistemas tanto la cavidad como cada una de las paredes y se evaluará su efecto en la función de coste.

## FORMULACIÓN DEL MODELO

El sistema bajo estudio es un sistema compuesto por una cavidad rellena de fluido (aire) rodeada por una estructura formada por placas planas con las que está en contacto. Por tanto nuestro modelo se rige por las ecuaciones del movimiento de ambos sistemas:

$$M_s\ddot{q} + K_s = f_s + f_{bs} \quad (4a)$$

$$M_f\ddot{p} + K_f = f_f + f_{bf} \quad (4b)$$

donde los subíndices $s$ y $f$ hacen referencia a los dominios estructural y fluido, respectivamente; $M$ es la masa equivalente del sistema; $K$ la rigidez equivalente; $f_s$ y $f_f$ las fuerzas ejercidas sobre la estructura y el fluido y $f_{bj}$ un término que tiene en cuenta el acoplo entre ambos dominios. Ambos dominios están relacionados mediante dos condiciones de acoplo, uno dinámico y otro cinético:

$$\sigma\vec{n}_s = -p\vec{n}_s \quad (5a)$$

$$\nabla p\vec{n}_f = -\rho_o\ddot{q}\vec{n}_f \quad (5b)$$

siendo $\sigma$ la tensión en la estructura, *p* la presión en el fluido y $\rho_o$ la densidad del fluido. Acoplando las ec. (4) con las ec. (5) se tiene que el sistema acoplado se rige por el sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} M_s & 0 \\ -\rho_o c_o C_c^T & M_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_s & C_c \\ 0 & K_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_s \\ q_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_s \\ f_f \end{pmatrix} \quad (6)$$

siendo $c_o$ la velocidad de propagación del campo acústico en el fluido y $C_c$ un coeficiente de acoplo en la frontera entre los dos medios. Este tipo de formulación conduce a modelos muy grandes que requieren de grandes recursos de computación, necesidad que podría ser relajada si se utilizara un modelo de elementos de frontera para la cavidad, pero estamos interesados en conocer la respuesta media en todo el recinto. La gran cantidad de puntos en los que se calcula el campo de presiones compensa el esfuerzo de cálculo empleado.

## EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTRUCTURA

El objetivo esencial de este trabajo es la evaluación de la influencia de la estructura que da forma al recinto en la respuesta del mismo. Para alcanzar dicho fin no es necesario implementar un proceso de optimización basta con utilizar el procedimiento propuesto en [6] (que no tiene en cuenta la estructura) y desarrollar un estudio paramétrico sobre las características de la estructura del que se obtenga $\chi$ para cada caso, la comparación de los valores de la función de coste nos da información sobre la importancia de la estructura en el resultado (de optimización).

El procedimiento utilizado es el siguiente. Se determina la geometría óptima para un recinto de pequeño volumen de acuerdo a las directrices de [6]. Después, se construyen modelos para un conjunto de casos que incluyen diferentes geometrías –incluyendo la del caso obtenido como óptimo–, diferentes paredes –se utiliza un único material y se varía su espesor– y diferentes posiciones emisión-recepción. A continuación se determina la respuesta del sistema para todos los casos y, por último, a partir de ella se obtiene el valor de la función de coste de cada caso.

| | $L_x$, m | $L_y$, m | *d*, mm |
|---|---|---|---|
| Recinto 1a | 2.5 | 4.1 | – |
| 1b | 2.5 | 4.1 | 20 |
| 1c | 2.5 | 4.1 | 40 |
| Recinto 2a | 2.9 | 3.5 | – |
| 2b | 2.9 | 3.5 | 20 |
| 2c | 2.9 | 3.5 | 40 |
| Recinto 3a | 3.2 | 3.2 | – |
| 3b | 3.2 | 3.2 | 20 |
| 3c | 3.2 | 3.2 | 40 |

*Tabla 1*. Características de los recintos estudiados. $L_x$ y $L_y$ son las longitudes de las aristas del plano horizontal, *d* es el espesor de las paredes.

Dado que nos centramos en recintos de pequeño tamaño, en todos ellos se decidió fijar el volumen, V = 20 m$^3$ y la altura $L_z$ = 2 m. El material de las placas con que se supone hechas las paredes es aglomerado de madera. El resto de las propiedades relevantes se muestran en la tabla 1.

## RESULTADOS

Los resultados del estudio se resumen en la figura 1. En esta figura se muestra la respuesta en nivel, las frecuencias modales, la línea recta de mejor ajuste utilizada para el cálculo de los residuos y el valor de éste. Se observa que las respuestas de los recintos donde no se han considerado las paredes el número de modos es menor, así como, naturalmente, su densidad modal, también se observa como, efectivamente, la distribución de modos a lo largo del eje de frecuencias es más homogéneo en este caso. Las placas aportan parte de sus modos al recinto de forma que la respuesta de éste es más densa modalmente de lo que se esperaría en un estudio de estas características.

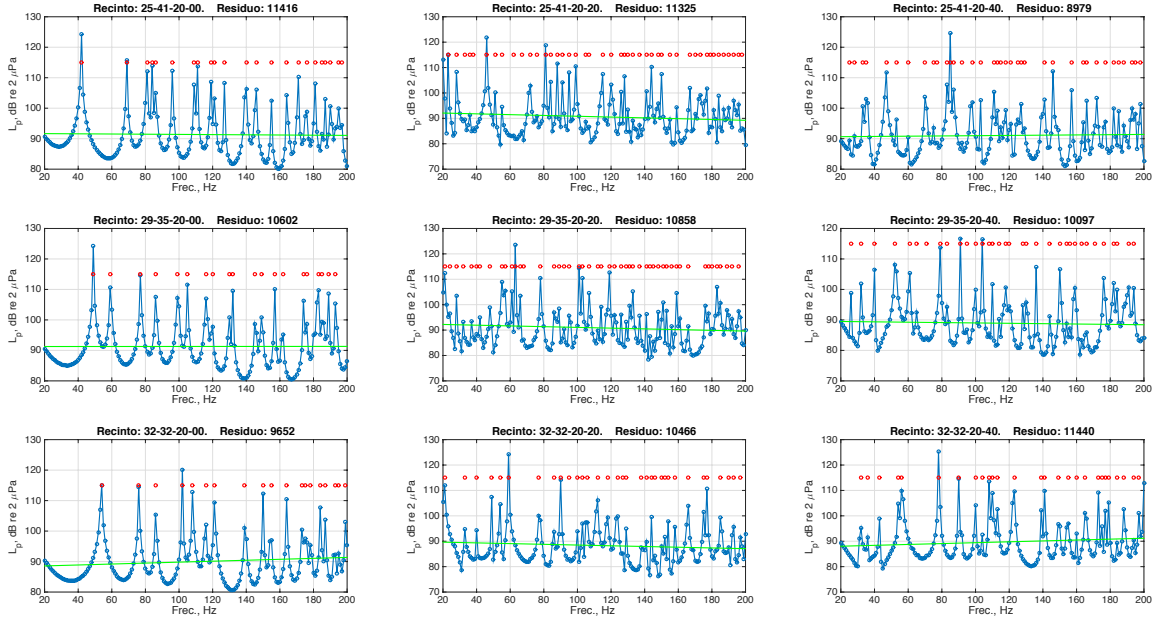



*Figura 1*. Respuesta en frecuencia de los recintos estudiados. Se muestran además las frecuencias modales y el valor del residuo.

En la tabla 2 se ofrecen los valores de los residuos para cada caso. Se puede ver que el comportamiento en función del espesor de las placas es diferente en cada caso. En el recinto 1 la puntuación disminuye cuando aumenta el espesor, indicando la ventaja de instalar paredes gruesas. En el recinto 3 la tendencia es la contraria, los resultados indican que en este caso sería mejor elegir recintos con paredes lo más delgadas posibles. El recinto 2 también conduce a la elección de paredes gruesas pero con una tendencia diferente a la del recinto 1. La razón reside en el hecho de que la geometría influye en la posición de los modos del recinto y el espesor en los de las placas y la fortaleza del acoplo es función de la posición y amplitud relativa entre ambos, por lo que ambas magnitudes deben tenerse en cuenta en un estudio exhaustivo.

| | | d, mm | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **–** | **20** | **40** |
| $L_x$ x $L_y$ m | **2.5*x*4.1** | 11416 | 11325 | 8979 |
| | **2.9*x*3.5** | 10602 | 10858 | 10097 |
| | **3.2*x*3.2** | 9652 | 10466 | 11440 |

*Tabla 2*. Valor de los residuos para los casos indicados

Se debe señalar que la puntuación del caso designado como base del estudio –recinto 2 sin paredes– es superior a la puntuación del recinto 3. El procedimiento utilizado aquí no se basa en el estudio de la base modal completa de los recintos, sino en el estudio de un respuesta del sistema en la que no tienen por qué haberse excitado toda su base modal. El conjunto concreto de los modos excitados dependerá de las posiciones elegidas para las fuentes y los receptores. Como ya se ha dicho, para elegir el caso de referencia se utilizaron las posiciones emisor-receptor propuestas en [6], mientras que los resultados resumidos en la figura 1 y la tabla 2 se obtuvieron utilizando otras posiciones emisor-receptor. Este resultado ilustra que efectivamente este par de parámetros es importante y que mediante este procedimiento lo que se optimiza es el recinto para un uso concreto definido por el par emisor –receptor.

Obsérvese también que las dimensiones de las aristas horizontales del recinto 3 (el de mejor puntuación) son iguales. En general, este caso se suele considerar como perjudicial ya que en las aproximaciones clásicas este hecho implica que los modos axiales en los ejes $X$ e $Y$ coinciden dando lugar a modos degenerados fuertes que, además perjudican la homogeneidad espectral. La razón por la que los resultados parecen contradecir esta regla se basa también en el argumento anterior: a pesar de partir de un recinto con una geometría *a priori* deficiente las posiciones emisor-receptor (y en menor medida el espesor de las paredes) han sido capaces de contrarrestar esta deficiencia.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia de las paredes en el campo acústico de un recinto y se ha mostrado que, para recintos pequeños y paredes ligeras, su efecto es apreciable y debería tenerse en cuenta.

Se ha esbozado un procedimiento de diseño para este tipo de salas que tiene en cuenta el uso que se le vaya a dar y que es aplicable a cualquier geometría (no solo paralelepipédica). En este sentido se debe reconocer que para recintos de tamaño apreciable la carga computacional determinaría el límite práctico.

También se muestra que mediante el manejo adecuado de los parámetros del problema (configuraciones de uso de la sala, elementos constructivos de los que está hecha), se pueden contrarrestar las posibles debilidades de su diseño geométrico en casos en que sobre éste existan restricciones arquitectónicas.

## REFERENCIAS

[1] R. H. Bolt, “Note on The Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 18, pp. 130–133 (1946).
[2] M. M. Louden, “Dimension Ratios of Rectangular Rooms with Good Distribution of Eigentones”, Acustica 24, 101–104 (1971).
[3] C. L. S. Gilford, “The Acoustic Design of Talk Studios and Listening Rooms”, J. Audio. Eng. Soc. 27, 17–31 (1979).
[4] O. J. Bonello, “A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes”, J. Audio. Eng. Soc. 29, 597–606 (1981).
[5] A. Moreno, J. Ruiz, C. de la Colina, “Re-visiting Bolt’s criterion for homogeneous distribution of normal frequencies in rectangular enclosures”, Proc. TecniAcústica (2000)
[6] T.C. Cox, P. D’Antonio, M.R. Avis, “Room Sizing and Optimization at Low Frequencies”, J. Audio Eng. Soc., 52, (2004).
[7] S. Ortiz, p. Cobo, L. Gonzalez, D. Rodriguez, V. Theofilis, “Acoustic resonances in a 3D open cavity. Comparison of experimental and numerical results, Proc. Internoise (2012)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN LOS ORIFICIOS DE OCTAVA DEL OBOE

PACS: 43.75.Ef, 43.66.Jh

C. Blasco-Yepes[1]; M.T. Sala Milvaques[2]; I. Navalón Sala[3]
[1]Conservatorio Superior de Música Joaquín Rodrigo de Valencia (España).
cablasy@gmail.com,
[2]Centre Professional de Música "Mestre Onofre Diez Monzó" Montserrat (España).
maiteoboe@gmail.com,
[3]Conservatorio Profesional de Música Tenor Cortis de Denia (España).
isabelnavalonsala@hotmail.com

## RESUMEN

El oboe octavea gracias a un mecanismo que permite duplicar la frecuencia de onda para producir las notas agudas. Este mecanismo es un orificio perforado sobre un inserto metálico roscado a la madera. Los materiales de construcción se pueden variar para conseguir cambios en la sonoridad. El estudio acústico muestra que existen diferencias significativas en el timbre entre los materiales utilizados: metal y caucho, siendo las octavas de caucho más armónicas ($p>0,50$) y con mayor concentración de energía en la parte media del espectro ($p<0,50$), pero no aparecen para la afinación ni la intensidad.

## ABSTRACT

The modern oboe makes octaves thanks to a mechanism that allows doubling the frequency of wave to produce high notes. This mechanism is a perforated hole on a threaded insert metal to wood. You can vary the building materials in order to obtain changes in the sonority. The acoustic study shows the existence of significant differences in timbre between the materials used: metal and rubber, being the octaves of rubber more harmonic ($p<0,50$) and with more concentration of energy in the middle part of the spectrum ($p<0,5$), but they do not appear to pitch or intensity.

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo se centra sobre las octavas, los dos únicos orificios del oboe que están construidos y suplementados a la madera y no perforados directamente sobre ella. El objetivo es realizar una introducción al comportamiento acústico de los diferentes materiales de fabricación de estos implantes.

Las octavas en el oboe suelen venir de fábrica construidas en metal, más concretamente alpaca y los oboístas no suelen centrar su atención en esta parte del oboe excepto cuando aparecen los problemas de acumulación de agua. Y es principalmente a partir de este problema cuando los oboístas se han planteado poder cambiar los materiales de fabricación: en vez de metal, caucho.

La alpaca es un metal que condensa rápidamente el aire caliente que se expulsa de la boca del oboísta al interpretar, la diferencia de temperatura entre el metal y el aire expulsado es tal, que las gotas de agua no tardan en aparecer dificultando la interpretación de los oboístas. Sin embargo, el caucho es un material plástico y por lo tanto la diferencia de temperaturas entre el caucho y el aire no es tan grande, provocando que no se produzca la condensación y las octavas se mantengan limpias para una buena ejecución musical.

Sin embargo, ¿existen diferencias acústicas entre estos dos materiales además de la diferencia de la condensación del agua? [1] estudiaron la influencia de los bocales en el fagot, comparando el comportamiento acústico de dos bocales en el mismo fagot mediante un soplado artificial. Después experimentaron con fagotistas, usando siempre la misma lengüeta. Con este estudio determinaron cómo los materiales de construcción de los bocales y el espesor y contorno del mismo influían en el timbre del fagot.

Un resultado interesante es que la geometría de los bocales tenía una mayor influencia en el comportamiento acústico (10%) que los materiales de fabricación (2%). [2] publicaron un estudio sobre el comportamiento acústico de las diferentes boquillas de la trompa y las preferencias de los trompistas por ellas. Trataron de identificar las cualidades subjetivas más importantes que, probablemente, estuvieran influenciadas por la geometría de la boquilla de la trompa. Las variables psicoacústicas evaluadas fueron: la flexibilidad, el control de la afinación, la facilidad de interpretación, la entonación, la tonalidad (la calidad del sonido producido), el rango dinámico, y la claridad del ataque (la suavidad y rapidez en el inicio).

En este artículo nos centramos pues en el estudio objetivo de la influencia del material de fabricación de las octavas en el sonido del oboe, estudiando a través de mediciones acústicas las hipótesis emitidas. Para ello grabamos una serie de notas que están influenciadas por estas octavas y comprobamos su comportamiento.

## 2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

### 2.1. Tipos de octavas utilizadas

El parámetro esencial para el estudio va a ser el componente de fabricación de las octavas: de metal y de caucho (figura 1). El orificio de las octavas tienen un diámetro de 0’70 mm para la primera octava y 0’80 para la segunda octava (figura 2), manteniéndose constante estas dimensiones en los dos juegos de octava utilizados.



*Figura 1. Fotografía de una octava de metal (izquierda) y otra de caucho (derecha).*

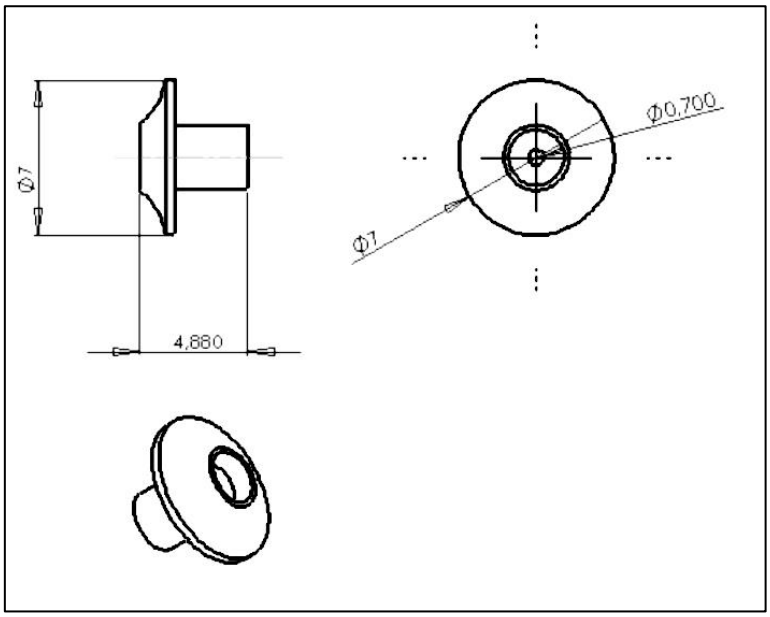



*Figura 2. Dibujo acotado de las dimensiones de la primera octava.*

El sistema de octavas en el oboe se utiliza para duplicar la longitud de onda producida por el sonido fundamental. Esta fundamental, a su vez, es producida por la sucesión de taladros perforados directamente en la madera. Lo que conocemos como primera octava, afecta a las notas de $mi_5$ a sol $\#_5$ y la segunda octava de $la_5$ a $do_6$.

El oboe utilizado es un oboe Marigaux modelo 901 con número de serie 38572 (año de fabricación 2014).

Las octavas utilizadas fueron las originales de metal que montó la fábrica Marigaux en el montaje del instrumento, mientras que las octavas de caucho se fabricaron a mano expresamente para ese oboe por el luthier de instrumentos de oboe Santiago Guillot Martínez.

### 2.2. Hipótesis sobre los tipos de octavas

Podemos formular varias hipótesis sobre la influencia que va a tener el material de construcción de las octavas.

En primer lugar, creemos que los materiales de construcción no afectarán a los parámetros de afinación e intensidad, ya que las dimensiones de las piezas se mantendrán constantes, por lo que las octavas de caucho se comportarán igual que las de metal en cuanto afinación e intensidad [3].

En segundo lugar, podemos pensar que las octavas de caucho serán más armónicas que las de metal, por la naturaleza de su componente.

En tercer lugar, emitimos la hipótesis que las octavas de caucho afectarán el “color” del sonido, es decir la presencia de armónicos agudos y la forma general del espectro, con más concentración de energía.

### 2.3. Ejercicios de interpretación instrumental

Para estudiar el comportamiento y las posibilidades de las octavas, hemos grabado una serie de notas que ponen en relieve las principales características de las octavas: $mi_5$, $fa_5$, fa $\#_5$, $sol_5$, sol $\#_5$, $la_5$, $si_5$ y $do_6$ (figura 3). Cada nota se grabó tres veces, ejecutándose en fortissimo (ff), en mezzoforte (mf) y en pianissimo (pp).

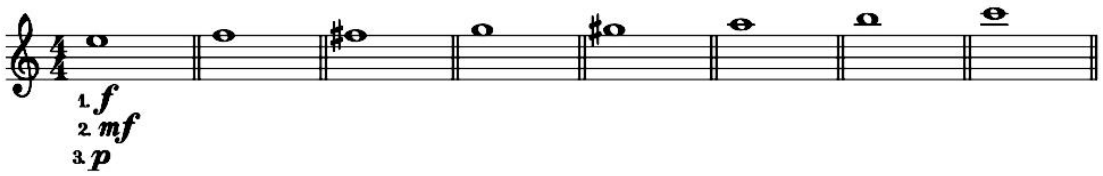



*Figura 3. Ejemplo musical de las notas grabadas.*

### 2.4. Grabación

La grabación se realizó en una sola sesión, en la sala de conciertos del Conservatorio Profesional de música de Cullera. Esta sala tiene unas características adecuadas para la grabación de instrumentos. Se utilizó un micrófono SONY ECM-MS907 y se registró en un M-AUDIO MICROTRACK II. La grabación fue realizada por el oboísta Fermín Clemente Bó (figura 4).

Las condiciones de temperatura y humedad relativa se mantuvieron durante las 3 horas de grabación, la temperatura era de 25º C y la humedad relativa del 65%. El mantenimiento de la temperatura constantes es muy importante, ya que debemos pensar que uno de los problemas que más afectan a los instrumentistas de viento es la temperatura, porque las diferencias en ella pueden provocar cambios en la afinación de las notas [4].



*Figura 4. Fotografía del momento de la grabación.*

## 3. RESPUESTAS ACÚSTICAS GLOBALES DE LAS OCTAVAS

En esta parte se estudian las características acústicas generales de cada octava, utilizando todos los ejercicios de interpretación grabados. Para ello, realizamos una serie de pruebas T pareadas (pairedsamples T-test o test de Student pareado) comparando para cada par de octavas las mediciones acústicas de un mismo ejercicio de interpretación. De esta manera podemos averiguar si las diferencias de sonoridad existentes entre las diferentes octavas son diferencias significativas o no.

### 3.1. Mediciones acústicas realizadas

Utilizando el programa Praat [5] se han medido los principales parámetros acústicos que agrupamos en las siguientes categorías:

1. parámetros relativos a la intensidad: amplitud media; intensidad máxima y media (dB); energía; potencia y media cuadrática (*Root-mean-square* RMS).

2. parámetros relativos a la variabilidad de la intensidad: desviación estándar de la amplitud.

3. parámetros relativos a la afinación: frecuencia fundamental máxima, mínima y media (Hz y semitonos).

4. parámetros relativos a la estabilidad de la afinación: desviación estándar (en Hz y semitonos) de la frecuencia fundamental; pendiente media de la frecuencia fundamental (en Hz y semitonos).

5. parámetros relativos a la facilidad de vibración: cantidad de ciclos con una altura definida (*Nº voiced frames*).

6. parámetros relativos a la armonicidad: armonicidad media y su desviación estándar.

7. parámetros relativos al timbre: diferencia de energía de bandas entre las frecuencias por debajo de 100, 200, 300, 400, 500, 700, 1000 y 2000 Hz; centro de gravedad del espectro; momento central del espectro, Kurtosis del espectro, Skewness del espectro y desviación estándar del espectro.

### 3.2. Intensidad sonora

Se han comparado los dos juegos de octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la intensidad. Utilizamos la medición de la intensidad (dB) como medida más representativa, y comparamos para cada par de octavas con una prueba T pareada (paired samples T-test) todos los valores de intensidad en todos los ejercicios, como se puede ver en la tabla 1.

Como podemos observar, las octavas de metal son las que mayor intensidad consiguen aunque no de forma significativa (*t=-0,274* y *p>0,05)* por lo que la intensidad sonora general parece estar ligada a otras características del oboe y no a los diferentes materiales de construcción de las octavas.

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | -2083217605 228118 | 3480412049 6759688 | 7594881746 322159 | -179258633 14362208 | 137594281 03905972 | -,274 | 20 | ,787 |

a. Parámetro = intensitydB

*Tabla 1. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de intensidad (dB).*

### 3.3. Variabilidad de la intensidad

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la variabilidad de la intensidad. Utilizamos la medición de la desviación estándar de la amplitud como medida más representativa; los resultados de la prueba T pareada (paired samples T-test) pueden verse en la tabla 2.

Los resultados de la tabla 2 indican que la desviación estándar de la amplitud no parece estar ligada a los materiales de construcción de las octavas, siendo las octavas de caucho las que mayor amplitud consiguen (t=0,212 y p>0,05) aunque no de forma significativa.

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | ,00011639927 5921 | ,002517079 561965 | ,00054927 1791568 | -,00102936 1603905 | ,00126216 0155746 | ,212 | 20 | ,834 |

a. Parámetro = amplStdDev

*Tabla 2. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de desviación estándar de la amplitud.*

### 3.4. Afinación

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la afinación.

Utilizamos la medición de la frecuencia media (F0 en semitonos) como medida más representativa de la afinación; con la prueba T pareada (paired samples T-test) obtenemos los resultados de la tabla 3.

Como podemos observar en la siguiente tabla, las notas interpretadas con las octavas de caucho están ligeramente más altas que las de las octavas de metal, no siendo significativo en ninguno de los casos (t=0,888 y p>0,05).

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | 38687870 2772487 | 17960907 45933437,5 | 43561599 1686939,8 | -53658594 6430164 | 13103433 51975138 | ,888 | 16 | ,388 |

a. Parámetro = MeanF0st

*Tabla 3. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de frecuencia media (F0 en semitonos).*

### 3.5. Estabilidad en la afinación

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la estabilidad de la afinación. Utilizamos la medición de la desviación estándar en semitonos como medidas más representativas; los datos del análisis estadístico (paired samples T-test) pueden verse en la tabla 4.

Los datos indican que las octavas fabricadas en metal son más estables que las octavas de metal de forma significativa (*t=2,20* y *p<0,05*).

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | ,00592475 4273940 | ,01232099 6235967 | ,00268866 1804218 | ,00031630 4028281 | ,01153320 4519599 | 2,204 | 20 | ,039 |

a. Parámetro = stdDevSt

*Tabla 4. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de desviación estándar en semitonos.*

### 3.6. Facilidad de vibración

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la facilidad en la vibración. Utilizamos la medición de *Nº voiced frames* como medida más representativa; una prueba T pareada (paired samples T-test) entre los dos pares de octavas (tabla 5) muestra una diferencia muy significativa entre los dos juegos de octavas, siendo las octavas de metal las que mayor facilidad de vibración obtienen (*t=-4,69* y *p<,001*).

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | -70,83333 33333333 70 | 64,045250 54714875 0 | 15,095610 32156011 0 | -102,6822 87146661 620 | -38,98437 95200051 30 | -4,692 | 17 | ,000 |

a. Parámetro = NoVoicedFrames

*Tabla 5. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de Nº voiced frames.*

### 3.7. Armonicidad

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con la armonicidad.

Utilizamos la medición de la media de la armonicidad (harmonics-to-noise ratio) como medida más representativa; con el análisis estadístico (paired samples T-test) obtenemos los valores de la tabla 6.

Observamos que las octavas de caucho son las que mayor armonicidad tienen, aunque no de forma significativa (*t=0,17* y *p>0,05*). Las octavas de metal parecen pues introducir más ruido en el sonido producido.

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | 64976311,1948594 | 166055528230357,64 | 362362870324519,15 | -69089939,09483961 | 82085201,33381149 | ,179 | 20 | ,859 |

a. Parámetro = HarmonicityMean

*Tabla 6. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de armonicidad media.*

### 3.8. Timbre

Se han comparado las octavas según diferentes medidas acústicas relacionadas con el timbre. Al medir la Kurtosis y la Skewness del espectro, observamos que las octavas de caucho tienen mayores valores de Kurtosis que de Skewness, siendo el primero de ellos significativo, como se puede ver en la tabla 7 y 8. Una kurtosis más alta indica que hay más energía entorno al centro espectral, y una kurtosis baja indica en general un espectro más plano. Una skewness más alta indica que la energía se distribuye más en la parte grave (inferior al centro espectral). Tenemos pues que el sonido con las octavas de caucho distribuye la energía en la parte central de forma significativa (*t=2,60* y *p<0,05*) mientras que el sonido producido por las octavas de metal obtiene más energía en la parte grave del espectro, aunque no de forma significativa (*t=-0,28* y *p>0,05*).

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | 4830368364,040740 | 850342709,2201470 | 185559991,9835784,2 | 95965475,8513989 | 87010819,69567491 | 2,603 | 20 | ,017 |

a. Parámetro = spectrumKurtosis

**Prueba de muestras relacionadas[a]**

| | | Diferencias relacionadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Media | Desviación típ. | Error típ. de la media | 95% Intervalo de confianza para la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | ValorCaucho - ValorMetal | -1130201178 204630 | 182346316 95907520 | 397912285 7911294,5 | -94305060 11987322 | 71701036 55578062 | -,284 | 20 | ,779 |

a. Parámetro = spectrumSkewness

*Tabla 7 y 8. Prueba T, comparando las diferentes octavas en los valores de Kurtosis (arriba) y Skewness (abajo).*

## 4. DISCUSIÓN

Si analizamos los resultados globales de comparación de las octavas, observamos que tenemos una diferenciación clara para los parámetros ligados al timbre, específicamente a la distribución de la energía en el espectro (kurtosis espectrales) con la octava de caucho asociada a un sonido distribuido en el medio y con formantes más marcados. Además, las octavas de caucho son las que mayor armonicidad tienen, aunque no de forma significativa, siendo las de metal las que más ruido producen. Todas estas características acústicas se corresponden con las apreciaciones subjetivas de más graves, menos brillantes y más resonantes, proporcionando más claridad en la interpretación y un centro tonal mucho más claro para las octavas de caucho.

Las octavas de metal son más estables en la afinación y presentan una mayor facilidad de vibración respecto a las de caucho de forma significativa en ambos casos, y esto podría ocurrir por la naturaleza de la composición del material. Es decir, el caucho, a causa de la fricción, provoca irregularidades microscópicas en la pared de la octava al perforar el orificio, por el contrario el metal tiene mucha más resistencia a la fricción y la pared del conducto resulta más lisa al perforarse.

En el resto de parámetros medidos, no se distingue un patrón ligado al componente de fabricación de las octavas, y parece que predominan más las características intrínsecas de cada octava. Por ejemplo, las octavas de metal se caracterizan por ser las que mayor intensidad consiguen mientras que las de caucho las que mayor amplitud de intensidad consiguen aunque de forma no significativa en ambos casos.

Por otra parte, hemos analizado el comportamiento de las octavas en cada nota grabada, para ver si existen diferencias significativas entre ellas y en ninguno de los ejercicios aparecen. Tan solo para la nota sol# interpretada en *mezzoforte* aparece alguna significatividad ($p=0,50$), pero se encuentra en el límite de ésta.

No obstante, la nota sol# es una nota que se encuentra en el medio de las dos octavas, es decir, en el límite y ni la primera octava ni la segunda son las ideales en esta nota, ya que se podría emitir tanto con una como con la otra.

## 5. CONCLUSIONES

Después de haber realizado un estudio acústico de la influencia en el sonido de los distintos materiales de construcción en las octavas del oboe, podemos afirmar que los diferentes materiales ofrecen diferencias significativas.

Las hipótesis que habíamos enunciado se verifican. En primer lugar, hemos observado cómo los materiales de construcción no han afectado a la afinación general de las notas ni a su intensidad, ya que al mantenerse constantes todas las medidas internas y externas de construcción, la afinación no se ve afectada [6], [7].

Aunque sí han aparecido diferencias significativas en la estabilidad de la afinación, creemos que estas diferencias se deben a las imperfecciones microscópicas de las paredes del orificio de perforación de las octavas de caucho.

Por último, observamos cómo la naturaleza de los componentes sí mostraba diferencias significativas en el timbre del sonido, siendo las octavas de caucho más armónicas y con una concentración de energía en la parte media del espectro.

En futuras investigaciones es importante aumentar el número de octavas de la misma naturaleza e incluso de componentes diferentes, para así poder tener más muestras sonoras y evitar al máximo las particularidades de cada octava.

## 6. REFERENCIAS

[1] Baumgart, J., Grothe, T., y Grundmann, R. (2008). Influence of the bocal on the sound of the bassoon. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123 (5), 3016.

[2] Plitnik, G.R. y Lawson, B.A. (1999). An investigation of correlations between geometry, acoustic variables, and psychoacoustic parameters for French horn mouthpieces. *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (2), 1111-1125.

[3] Blasco-Yepes C. (2010). *Influencias en la percepción sonora y en la interpretación del rebajado de la lengüeta del oboe.* Tesis doctoral. UPV, Valencia.

[4] Boersma, P. & Weenink, D. (consulta 2011). *Praat: doing Phonetics by Computer.* www.praat.org.

[5] Fletcher, N. H. y Rossing, T. D. (1998). *The Physics of Musical Instruments.* New York: Springer-Verlag.

[6] Harris, C.M., Eisenstadt, M. y Welss, M. (1963). Sounds of the Highland Bagpipe. *Acoustical Society of America*, 1321-1327.

[7] Ayers, R.D., y Nordquist, P.R. (2009). Tuning and tone quality of bagpipe drones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 125 (4), 2652-2652.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CAÑAS DE OBOE DE FABRICACIÓN PROPIA: RESPUESTA SUBJETIVA DE LOS OYENTES

**PACS:** 43.66.Jh.

Jesús Alba, Romina del Rey, Juan Pedro Romero
Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.
Universitat Politècnica de València.
Escuela Politécnica Superior de Gandia (EPSG). C/ Paraninfo nº1, Grau de Gandia 46730 (Valencia). España.
E-mail: jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es , oboe_juanpedro@hotmail.com

## ABSTRACT
This paper presents the results of a subjective study of approximately 1400 recordings from different musical passages which were played with different oboe reeds. Many possibilities have been evaluated: reed origin, time of use, musician, room, etc. With these data, we have a part of objective assessment based on the distribution of harmonics. In order to have a subjective response has launched an opinion survey. The survey ask about a selected set of samples. A total of 447 people have answered this survey online. Results shown in this paper are based on gender, age, level of musical studies, etc. of the survey respondent. All this work is included in a PhD work which will be presented at the end of 2015.

Keywords: Oboe, music, sound quality, oboe reeds, subjective response

## RESUMEN
En este trabajo se presenta un estudio subjetivo de una batería de aproximadamente 1400 grabaciones de distintos pasajes interpretados con cañas de oboe. Se han evaluado múltiples posibilidades: origen de la caña, tiempo de uso, intérprete, recinto, etc. Con estos datos ya se tiene una parte de valoración objetiva en función de la distribución de armónicos. Para poder disponer de una respuesta subjetiva se ha puesto en marcha una encuesta donde se pide la opinión al público en general sobre un conjunto seleccionado de muestras. Un total de 447 personas han contestado esta encuesta on-line. Se muestran resultados en este trabajo, en función de sexo, edad, nivel de estudios musicales, etc. Todo este trabajo se engloba dentro de una Tesis Doctoral que se presenta a final de 2015.

Palabras clave: Oboe, música, calidad sonora, cañas, respuesta subjetiva

## INTRODUCCIÓN

Todos los músicos profesionales coinciden en que las cañas de calidad para una correcta reproducción sonora tienen una corta duración. Su vida útil, una vez puesta a punto, es de unas pocas horas. En el caso de cañas de doble lengüeta, como las del oboe, este problema se acentúa. Esta es una de las conclusiones de la tesis doctoral titulada "Estudio de durabilidad de cañas de oboe a partir de parámetros de calidad sonora [1]" que se defenderá en diciembre de 2015.

Este trabajo presenta resultados de dicha tesis doctoral. En ediciones anteriores de Tecniacústica se han presentado también otras partes del cuerpo de esta tesis [2][3][4][5]. El conjunto de las 5 presentaciones pueden ilustrar cómo ha sido el avance de esta tesis y cómo se han ido tomando decisiones para analizar el comportamiento, la calidad y la duración de las cañas de oboe. En el trabajo de 2014 [5] se realizó un estudio detallado del comportamiento de muestras de 5 tipos de cañas de oboe provenientes de diferentes orígenes, uno de ellos de la Comunidad Valenciana. Estas se fabrican con la filosofía francesa y con ellas se graban en varias situaciones: cuando la caña se acaba de fabricar, en el inicio de su vida útil, y al final de ésta (unas 20 horas aproximadamente). Desde la primera grabación a la última pasan 9 meses. Además se combinan recintos de grabación: cámara anecoica, Aula Magna y un pasillo reverberante de la EPS Gandia. Se graban cañas cambiando el oboe y el oboísta, con diferentes equipos profesionales. Las cañas elegidas son cañas de origen francés provenientes de Var al sudeste de Francia (en especial en Fréjus) distribuidas por las empresas Alliaud, Alfa y Le Rosseau Chantant, cañas de marca Kge de origen chino y cañas autóctonas recolectadas en La Vila Joiosa (Alicante).

Se graban escalas cromáticas, ronquidos de oboe y pasajes orquestales: la 4 sinfonía de Tchaikovsky (2º movimiento), el concierto para violín de Bramhs (2º movimiento) y el solo de la sinfonía "Escocesa" de Mendelssohn (2º movimiento). Se superan así las 1400 grabaciones que se analizan de forma objetiva en la tesis y se presentan parte de los resultados en [5]. En este trabajo se presentan resultados de una encuesta "on-line" que se ha diseñado para valorar de forma subjetiva las grabaciones realizadas por el público en general.

## DISEÑO DE LA ENCUESTA

Se plantean tres bloques principales para la realización de las audiciones-encuestas. El primer bloque está formado por cinco cañas, cada una de un material distinto, trabajando así los cinco materiales en esta tesis. Se escuchará el mismo pasaje interpretado y grabado en la cámara anecoica en días diferentes, para comprobar si se aprecian diferencias en la durabilidad del material. Se elige:

- La muestra 3 de la caña Alliaud (Alliaud 3), una caña calificada como buena en cuanto a funcionamiento y sonido y el pasaje de Brahms, un solo lento para evaluar bien la calidad del sonido, el primer día de grabación y el último día de grabación. Esto constituyen las audiciones 1 y 1bis.
- La muestra 1 de las cañas chinas (Kge 1), que se considera "caña trampa" porque funcionaba bien pero el sonido no es bueno. Se utiliza el pasaje de Tchaikovsky que es el que mejor enmarcara este efecto por el registro agradable del instrumento. Se eligen los días 2 y 3 de grabación. Audiciones 2 y 2bis.
- La muestra 1 de las cañas Alfa (Alfa 1), una caña que mostró un cambio bastante importante pasando de muy buen sonido y funcionamiento a todo lo contrario. Pasaje de Mendelssohn que es el con el que más fácil se puede escuchar el funcionamiento de la caña por la dificultad del picado. Días 1 y 3. Audiciones 3 y 3 bis.
- La muestra 3 de cañas autóctonas (La Vila 3), una caña ni buena ni mala que estuvo más o menos estable en su duración. Pasaje de Mendelssohn, día 2 y 3. Audiciones 4 y 4 bis.
- La muestra 1 de cañas francesas Rosseau (Rosseau 1), muy buena caña. Pasaje de Brahms. Día 1 y 3. Audiciones 5 y 5 bis.

El segundo bloque pretende tratar el efecto del recinto comparando grabaciones en la cámara anecoica con el Aula Magna. La idea es estudiar cuanto influye la sala en la decisión puesto que además el intérprete tiene sensaciones diferentes, tocando mucho más cómodo en el Aula Magna. Se elige la muestra 1 de la caña Rosseau (Rosseau 1), el día 2, es decir cuando la caña está a medio uso y en óptimas condiciones y el pasaje de Tchaikovsky. Esto constituye las audiciones 6 y 6 bis.

El tercer bloque de audición-encuesta compara al intérprete. Hay que hacer notar que las cañas se construyen para un intérprete y su instrumento. Se pretende comprobar hasta qué punto el cambiar de intérprete profesional se puede apreciar. Se elige la primera muestra de caña autóctona (La Vila 1) que funciona muy bien en el primer día de grabación. Interpretan el pasaje de Brahms en la cámara anecoica dos oboístas profesionales distinto, músicos de orquestas importantes. Se configuran así las audiciones 7 y 7 bis.

Con estas muestras el oyente deberá puntuar de 1 a 5 cada nota siendo 1 la puntuación más baja, “No me gusta nada” al 5, “Me gusta mucho”. En la encuesta se recogen datos de edad, sexo, e información sobre los estudios musicales de los oyentes, desde “no tengo estudios”, “conocimientos de música”, y los diferentes títulos: Elemental, grado medio, y grado superior. Esto permite también filtrar posteriormente la opinión del oyente en función de sus conocimientos musicales.

La obtención de los datos se realiza mediante un encargo a una empresa especializada en encuestas online llamada Questinpro [6]. Se le prepara la información para colgarla en el servidor de encuestas. La figura 1 muestra cómo queda. Se realizó difusión por diferentes medios, incluso prensa escrita, emisoras de radio, etc.

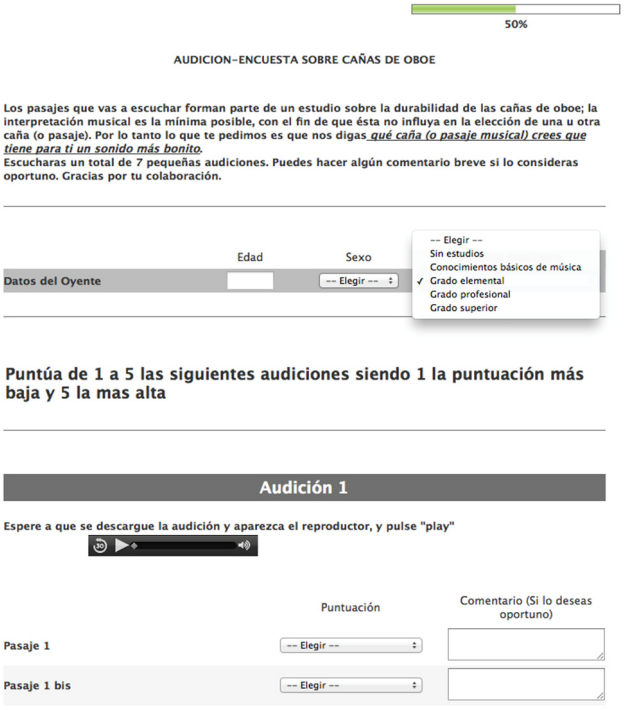



*Figura 1. Detalle de la encuesta que se realizó a través de internet.*

## ESTADISTICAS GLOBALES

La encuesta estuvo activa en torno a dos meses y medio. Fue vista por 2068 personas, de las cuales 604 la comenzaron. 447 personas completaron satisfactoriamente la encuesta con un tiempo medio de unos nueve minutos. Numerosos países han participado, en concreto 31, siendo

España claramente el más representado con 528 encuestas (87,42 %) seguido de Portugal y México con 8 encuestas cada uno (1,32 %).

Otros países también han participado en menor proporción como Italia, Gran Bretaña, Colombia, Francia, Alemania, Estados Unidos, Brasil, Venezuela, Perú, Chile, Holanda, Argentina, Paraguay, Nicaragua, Uruguay Luxemburgo, Ecuador, República Dominicana, Noruega, Australia, Irlanda. Las edades de los participantes han sido muy dispares, desde los trece años hasta los 80, aunque la edad del mayor número de oyentes está comprendida entre los 20 y 55 años. Los hombres han participado un poco más que las mujeres, un total de 255 (54,72 %) de hombres y 211 mujeres (45,28 %).

En cuanto al dato de estudios musicales que solicitamos, observamos que quien más participó fueron músicos con estudios de grado superior. Un total de 205 músicos con titulación superior, es decir el 43,34 % de los encuestados. Esto es relevante ya que es difícil conseguir que tantos músicos profesionales contesten una encuesta. En segundo lugar, músicos con estudios de grado profesional, 94 (19,87 %), seguidos de personas con conocimientos básicos de música 68 (14,38 %), personas sin estudios musicales 65 (13,74 %) y por último personas con el grado elemental de música 41 (8,67 %).

## RESULTADOS

El servidor de encuestas ofrece mucha información que hay que procesar. Se realiza un filtrado de los datos generando una plantilla en hoja Excel elaborada con el fin de poder filtrar los datos de la encuesta en función de lo que se desee. La encuesta tiene, entre otros, los siguientes campos: La dirección IP del encuestado: “IP Address”. Dia y hora de relleno de la encuesta: “Timestamp (DD/MM/YYYY)”. Dispositivo por el que te accede: “Device Data”. Tiempo tardado en rellenar la encuesta: “Time Taken to Complete (Seconds)”. País de origen y código de la región: “Country Code” y “Region”.

Además se han añadido los campos de “Edad”, ·”Sexo” y “Estudios musicales”. Este último clasifica en “1-Sin estudios de música”, “2-Conocimientos básicos de música”, “3-Grado elemental de música”, “4-grado profesional de música”, “5-grado superior de música”. A continuación se tiene una puntuación para cada grabación explicada en el punto 3.4., desde “1-No me gusta nada”, “2-No me acaba de gustar”, ·”3-Me es indiferente”, “4-Me gusta bastante”, “5-Me gusta mucho”. Además es posible añadir comentarios aclaratorios a cada grabación. Un ejemplo se muestra en la figura 2.

| Response ID | IP Address | Timestamp (DD/MM/YYYY) | Device Data | Time Taken to Complete (Seconds) | Response Status | Country Code | Region | Edad | Sexo | Estudios musicales | Puntuación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24946619 | 158.42.71.101 | 15/04/2015 11:12:57 | DESKTOP/LAPTOP: Windows 8 | 413 | Complete | ES | 60 | 43 | 1 | 4 | 5 |
| 24947696 | 85.152.89.231 | 15/04/2015 11:34:47 | TABLET: iPad | 687 | Complete | ES | 34 | 47 | 1 | 5 | 2 |
| 24951004 | 213.98.110.38 | 15/04/2015 12:40:58 | DESKTOP/LAPTOP: Windows (other) | 464 | Complete | ES | 34 | 38 | 1 | 2 | 3 |
| 24951770 | 85.57.188.137 | 15/04/2015 12:51:58 | SMARTPHONE: Android | 438 | Complete | ES | | 36 | 2 | 1 | 3 |
| 24952732 | 81.9.148.59 | 15/04/2015 13:06:20 | DESKTOP/LAPTOP: Windows (other) | 569 | Complete | ES | 34 | 39 | 1 | 1 | 5 |
| | | | DESKTOP/LAPTOP: | | | | | | | | |

*Figura 2. Ejemplo de la base de datos*

Sobre esos datos se construye unas plantillas en Excel para conseguir un mayor grado de detalle en la información obtenida. Las plantillas se definen con diferentes filtros que permiten selecciona un conjunto poblacional (por ejemplo, sólo los que tienen estudios superiores, o los que sean mayores a una edad, sexo, etc.). A continuación se muestra un ejemplo de tabla diseñada. En este caso se comparan todas las muestras completas (447) con sólo los de sexo "hombre" (248):

| PUNTUACIÓN | GLOBAL | FILTRO | GLOBAL (%) | FILTRO (%) | ACG(%) | ACF(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 37 | 23 | 8,7 | 9,3 | 8,7 | 9,3 |
| 2 | 136 | 81 | 32,0 | 32,7 | 40,7 | 41,9 |
| 3 | 114 | 70 | 26,8 | 28,2 | 67,5 | 70,2 |
| 4 | 113 | 61 | 26,6 | 24,6 | 94,1 | 94,8 |
| 5 | 25 | 13 | 5,9 | 5,2 | 100,0 | 100,0 |
| TOTAL | 425 | 248 | | | | |
| MEDIA | 2,89 | 2,84 | | | | |
| DESVIACION | 1,08 | 1,06 | | | | |
| MODA | 2 | 2 | | | | |
| MEDIANA | 3 | 3 | | | | |

*Tabla 1. Resumen AUDICION 1 -PASAJE 1, comparando GLOBAL con HOMBRE.*

La primera columna representa la puntuación desde "1-No me gusta nada" hasta "5-Me gusta mucho". A continuación aparecen dos columnas, "GLOBAL" y "FILTRO". En "GLOBAL" aparecen todos los resultados de la puntuación de la grabación correspondiente. En "FILTRO", aparecen los resultados después del filtro aplicado. En el ejemplo, SEXO = HOMBRE. La programación está descrita en la memoria de Tesis [1].

Las columnas "GLOBAL (%)" y "FILTRO (%)" convierten en porcentaje las columnas anteriores. Esto facilita la representación y comparación (figura 3).

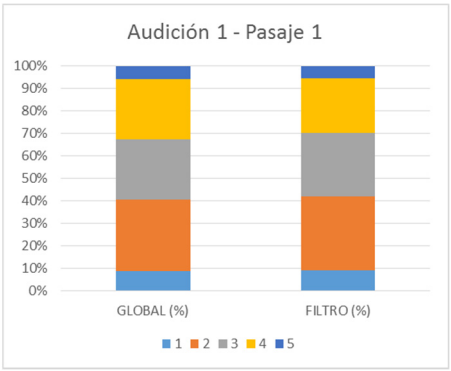



*Figura 3: Comparación de datos globales y filtro "Hombre"*

De esta forma puede apreciarse que para esta grabación en concreto, apenas hay cambios entre la población global y la población hombre. Se ve un pequeño aumento en las puntuaciones 1 a 3 que no es significativa. Además se obtienen varios estadísticos de la tabla GLOBAL y la tabla FILTRO. Se muestran las filas "TOTAL (T)" con el número de muestras de cada caso, el valor medio, la desviación estándar (D) que sirve para valorar si hay excesiva dispersión en los datos, y la moda (Mo), es decir, el valor que más se repite. También se obtiene la mediana (Me), es decir, el valor que está en medio de los datos. Para ello se realizan dos columnas adicionales ("ACG(%)" y "ACF(%)") que tienen los valores porcentuales acumulados.

En el caso de ejemplo que nos ocupa, la media es 2,89 para "GLOBAL" y 2,84 para "FILTRO" hombre. Esto significa que el valor más probable en ambos casos es ser "3- INDIFERENTE". La moda en ambos casos es 2, por lo que el valor más contestado ha sido "2- No me acaba de

gustar" y la mediana es 3, es decir, la mitad de la población piensan que la grabación es "3-Indiferente" o inferior.

En base este ejemplo se realiza los siguientes filtrados para conjuntos de población relevante de las 14 grabaciones de la encuesta. Los datos de detalle se encuentran en la memoria de Tesis [1]. Los elegidos para mostrar, después de diferentes pruebas de filtrado son los siguientes (los filtrados del tipo de dispositivo no dan cambios significativos):

1. Sexo=Hombre
2. Sexo=Mujer
3. Nivel de estudios: "1-Sin estudios de música"
4. Nivel de estudios: "2-Conocimientos básicos de música"
5. Nivel de estudios: "3-Grado elemental de música"
6. Nivel de estudios: "4-grado profesional de música"
7. Nivel de estudios: "5-grado superior de música".
8. Nivel de estudios: "4-grado profesional de música" o "5-grado superior de música".
9. Edad: Mayores de 30 años

En la tabla 2 se resumen los filtrados de los datos estadísticos de modo global.

| GLOBAL | TOTAL | MEDIA | DESVIACION | MODA | MEDIANA |
|---|---|---|---|---|---|
| AU1 | 425 | 2,89 | 1,08 | 2 | 3 |
| AU1 bis | 389 | 3,25 | 1,08 | 4 | 3 |
| AU2 | 422 | 3,42 | 1,04 | 4 | 4 |
| AU2 bis | 378 | 3,26 | 1,06 | 4 | 3 |
| AU3 | 423 | 3,24 | 1,10 | 4 | 3 |
| AU3 bis | 383 | 2,67 | 1,19 | 2 | 2 |
| AU4 | 426 | 2,21 | 1,05 | 2 | 2 |
| AU4 bis | 389 | 2,57 | 1,13 | 2 | 2 |
| AU5 | 428 | 3,00 | 1,17 | 4 | 3 |
| AU5 bis | 386 | 3,81 | 1,01 | 4 | 4 |
| AU6 | 421 | 3,55 | 0,96 | 4 | 4 |
| AU6 bis | 382 | 3,46 | 1,26 | 4 | 4 |
| AU7 | 423 | 2,88 | 1,27 | 4 | 3 |
| AU7 bis | 386 | 2,62 | 1,20 | 2 | 3 |

*Tabla 2. Estadísticos de los datos de encuesta*

Atendiendo a la media, la peor grabación es la audición 4, donde lo más contestado ha sido "2-No me acaba de gustar" siendo esta puntuación o menor la asignada por el 63,6% de los encuestados. La mejor grabación es la audición 5 bis, donde lo más contestado ha sido "4-Me gusta bastante". Un 68% opina esto o "5-Me gusta mucho". Respecto a la desviación, la audición 6 presenta la menor dispersión en sus respuestas. En el caso de la audición 7, se presenta la mayor dispersión, lo que indica mayor distribución en los resultados.

Se muestran a continuación de "peor" a "mejor" grabación las audiciones en base a los diferentes filtros (tabla 3). En la memoria de Tesis [1] existen datos de detalle similares a las tablas 1 y 2, y

figura 3, para las diferentes combinaciones. En la tabla 4, se muestran los resultados cruzados con la opinión previa de los profesionales respecto a las cañas.

| Global | Filtro 1 | Filtro 2 | Filtro 3 | Filtro 4 | Filtro 5 | Filtro 6 | Filtro 7 | Filtro 8 | Filtro 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 | AU4 |
| AU4 bis | AU4 bis | AU4 bis | AU4 bis | AU4 bis | AU7 bis | AU7 bis | AU4 bis | AU7 bis | AU4 bis |
| AU7 bis | AU7 bis | AU7 bis | AU7 | AU3 bis | AU4 bis | AU3 bis | AU3 bis | AU4 bis | AU3 bis |
| AU3 bis | AU3 bis | AU3 bis | AU7 bis | AU1 | AU7 | AU7 | AU7 bis | AU3 bis | AU7 bis |
| AU7 | AU1 | AU7 | AU3 bis | AU3 | AU3 bis | AU4 bis | AU5 | AU5 | AU1 |
| AU1 | AU5 | AU1 | AU1 | AU7 bis | AU1 | AU5 | AU1 | AU1 | AU7 |
| AU5 | AU7 | AU5 | AU1 bis | AU1 bis | AU5 | AU1 | AU7 | AU7 | AU5 |
| AU3 | AU3 | AU1 bis | AU3 | AU7 | AU3 | AU1 bis | AU2 bis | AU2 bis | AU3 |
| AU1 bis | AU6 bis | AU3 | AU2 bis | AU5 | AU1 bis | AU2 bis | AU1 bis | AU1 bis | AU2 bis |
| AU2 bis | AU2 bis | AU2 bis | AU5 | AU6 bis | AU2 bis | AU3 | AU3 | AU3 | AU1 bis |
| AU2 | AU1 bis | AU2 | AU2 | AU2 bis | AU6 bis | AU2 | AU2 | AU2 | AU6 bis |
| AU6 bis | AU2 | AU6 | AU6 bis | AU2 | AU6 | AU5 bis | AU6 bis | AU6 bis | AU2 |
| AU6 | AU6 | AU6 bis | AU5 bis | AU5 bis | AU2 | AU6 bis | AU6 | AU6 | AU6 |
| AU5 bis | AU5 bis | AU5 bis | AU6 | AU6 | AU5 bis | AU6 | AU5 bis | AU5 bis | AU5 bis |

*Tabla 3. Clasificación de "peor" a "mejor" según la población encuestada, con diferentes filtros*

| ENCUESTAS | GRABACIÓN | Calificación previa profesional | Orden |
|---|---|---|---|
| Vila 3.2.La.as.mp3 | Audición 4 | "Regular" | 1 |
| Vila 3.3.La.ah.mp3 | Audición 4 bis | "Regular" | 2 |
| Alfa 1.3.La.as.mp3 | Audición 3 bis | "Mal sonido" | 3 |
| Ally 3.1.La.as.mp3 | Audición 1 | "Buena" | 4 |
| Ros 1.1.La.ac2.mp3 | Audición 5 | "Muy buena" | 5 |
| Alfa 1.1.La.ac2.mp3 | Audición 3 | "Buen sonido" | 6 |
| Ally 3.3.La.as.mp3 | Audición 1 bis | "Buena" | 7 |
| Kge 1.3.La.as.mp3 | Audición 2 bis | "Sonido no bueno" | 8 |
| Kge 1.2.La.as.mp3 | Audición 2 | "Sonido no bueno" | 9 |
| Ros 1.2.La.mh.mp3 | Audición 6 bis | "Muy buena" | 10 |
| Ros 1.2.La.ah.mp3 | Audición 6 | "Muy buena" | 11 |
| Ros 1.3.La.as.mp3 | Audición 5 bis | "Muy buena" | 12 |

*Tabla 4. Opinión de los profesionales y resultados globales de la encuesta*

## CONCLUSIONES

Como se ha descrito en la introducción se ha realizado una batería de cañas diferentes, de las cuales se han medido diferentes eventos sonoros durante más de uno. Se han generado unas 1400 grabaciones. En una fase anterior a esta ponencia se evaluaron de forma objetiva. En este trabajo se ha descrito el procedimiento seguido para preparar una audición – encuesta y los resultados obtenidos. También de los datos de población, 447 encuestas completas, de las

cuales más de 200 son músicos profesionales en activo en diferentes orquestas, se han obtenido cientos de datos. Se han mostrado algunos resultados globales en este trabajo.

Si se analiza con detalle la tabla 3, puede ver que la población coincide con que la audición 4, seguida en su mayoría de la audición 4 bis (cañas autóctonas, calificadas de “regulares” en su calidad sonora por los profesionales) y la audición 7 bis son las peores. La audición bis está considerada como mala y es debido a que el intérprete en este caso no toca ni con sus cañas ni con su oboe y no está cómodo. La caña de esta audición era La Vila 1, una caña buena.

En cuanto a las mejores audiciones tenemos la AU5 bis que es la caña Rosseau 1 una caña muy buena. En este caso la coincide con la del intérprete, sobre todo de los profesionales de música. Sin embargo, otros grupos de población filtrados consideran algo mejor la grabación 6 o 6 bis. Es lógico respecto a la 6 puesto que es similar a la 5 bis. Sin embargo, la 6 bis, donde se incluye el Aula Magna, llega a confundir a los oyentes. También es curioso que la audición 2, tenga buenos resultados cuando la caña no es buena. Esto se acentúa si el oyente no tiene conocimientos musicales o éstos son bajos.

Esto justifica varias cosas. La influencia de la sala mejora la percepción de las audiciones, e incluso puede enmascarar en parte el hecho de que la caña no sea buena. Un intérprete que se fabrica sus cañas, puede llegar a tocar con una caña regular y conseguir la sensación de caña “buena”, como ocurre con la caña de la AU 2. Sin embargo, diferentes intérpretes no pueden intercambiar sus cañas porque no tocan cómodos y se percibe.

**REFERENCIAS**

[1] Juan Pedro Romero, “Estudio de durabilidad de cañas de oboe a partir de parámetros de calidad sonora”, Memoria de Tesis Doctoral (2015). Pendiente de defensa.
[2] J.P. Romero, J. Alba, J. Ramis. “ESTUDIO PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO DE CAÑAS DE OBOE”, Tecniacústica 2006, Gandia
[3]J. Cruañes, M. Parra, M. Fos, J. Alba, R. Del Rey, J.P. Romero, V. Llimerá, “INFLUENCIA DEL pH DE LA SOLUCIÓN DE HIDRATACIÓN EN LA CALIDAD SONORA Y DURABILIDAD DE CAÑAS DE OBOE” Acústica 2008, Coimbra, Portugal
[4] Romero, J. P., Alba J., Del Rey Tormos, R. (2010) Estudio de diferentes tipos de caña de lengüeta de oboe. 6º Congreso Iberoamericano de Acústica (Tecniacústica).

[5] Romero, J. P., Alba J., Del Rey Tormos, R. (2014) Estudio de la durabilidad de cañas de oboe a partir de parámetros de calidad sonora. 45º Congreso Español de acústica.

[6] Software para la realización de encuestas. http://canasoboe.questionpro.com/

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA MASA DINÁMICA DEL TRANSPOSITOR DE UN 'TROMBÓN DE VARAS' EN FUNCIÓN DE SU ESPECTRO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA

PACS: 43.66.Jh

Esteve Rico, Juan Carlos; Vera Guarinos, Jenaro

Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal.

EPSA - Universidad de Alicante-Campus de San Vicente del Raspeig.

Email: estevejuancarlos@yahoo.com; jenaro@ua.es;

**ABSTRACT**

The possibility of changing the impedance of the harmonic trombone registration within (Bb2, D4-Bb4) frequencies range, through the use of dynamic plugs that are screwed into the transpositor to cover it, is provided in this study. The purpose of the plugs, also called clappers, is to influence the homogeneity of sound register with a variety of dynamic masses and resonant bells addition. This study analyzes and places the importance of clappers within the overall sound of the trombone based on their spectrum of acoustic impedance.

KEYWORDS:

Trombone, transposing system, clapper, Stomvi, impedance, harmonic sound

**RESUMEN**

Se contempla la posibilidad de modificar la impedancia del registro armónico del trombón dentro del rango de frecuencias (Bb2,D4-Bb4) gracias al uso de tapones dinámicos que se enroscan en el transpositor para taparlo. La finalidad de los tapones, también llamados *clappers*, es influir sobre la homogeneidad del registro sonoro con una variedad de masas dinámicas y campanillas resonantes. El presente estudio analiza y sitúa la importancia de los *clappers* dentro del sonido global del trombón en función a su espectro de impedancia acústica.

PALABRAS CLAVE:

Trombón, transpositor, clapper, Stomvi, impedancia, armónicos, sonoridad

## INTRODUCCIÓN

Con el fin de alterar o mejorar el sonido del trombón de varas es usual, últimamente, actuar sobre los tapones que se roscan en el transpositor. La base teórica se encuentra en la dependencia que existe en la respuesta en frecuencias de un instrumento y la resistencia o impedancia a la vibración del mismo, que depende entre otras cosas de la masa del sistema vibrante. Justo es eso lo que el interprete músico valora durante la ejecución. También la respuesta en impedancia está relacionada con la calidad tonal que percibe el público.

Existe en el mercado, comercializado por la marca de trombones Stomvi un conjunto de estos tapones también llamados *clappers* que ya sea por su masa o por el diseño geométrico de su volumen interno, alteran de forma positiva la respuesta del instrumento según la opinión subjetiva tanto del fabricante como de los usuarios.

El propósito general de este estudio es, de forma objetiva por métodos experimentales, constatar los efectos que producen el uso de los antedichos *clappers* en el sonido del trombón.

Para ello, hemos planteado dos formas de abordar el problema:

Primeramente, se analizado la relación entre la masa con la que se sobrecarga el transpositor del trombón de varas y la influencia que esta ejerce sobre el espectro de impedancia del instrumento.

En la segunda, se ha realizado, entre intérpretes profesionales de este instrumento, un pequeño muestreo de las opiniones sobre la calidad musical de unas grabaciones realizadas para cada ejemplo estudiado.

## MATERIAL Y MÉTODO

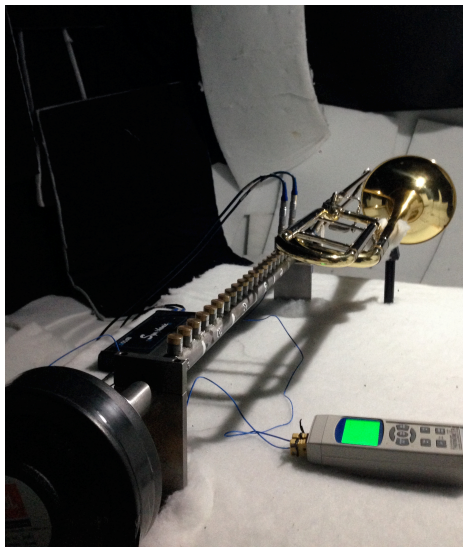


Ilustración 1-fotografía tomada por el autor

Para la determinación de la respuesta en impedancia del trombón, se usa un tubo de impedancia [7]. Aparte de que debe tener las dimensiones transversales adecuadas y debido a que el rango de frecuencias de este instrumento se encuentra entre 50 y 1000 Hz aproximadamente, se tuvo que construir un modelo específico a medida del problema[1], al cual se le ha añadido un amplificador de potencia y una fuente de ruido *Brüel&kjær,* un motor de agudos *JBL* de 2", dos micrófonos *Grass 1/4"* con preamplificador y prepolarizados a 200V. Estos se desplazaban a lo largo de las del tubo de impedancia (se necesitó usar una combinación de 20 posiciones).

El sistema de adquisición de datos que se ha utilizado es *01db Symphonie* con *la suite dBFA32*, mientras que para el post procesado se ha recurrido a los programas *software Acupro* y *Microsoft Excel.*

Se ha tenido especial cuidado en cuanto a: posición del instrumento, bombas de afinación, tuberías sin agua ni suciedad, la temperatura del aire[2] y a que nada obstaculizara ni reflejara la salida del sonido por la campana.

Para llevar a cabo las grabaciones de audio se utilizo un torso binaural de Head *Acoustic* usando su salida digital y la tarjeta de adquisición *SounBlaster-Audigy* y unos auriculares, *Sennheiser HD-380 Pro*, para la audición.

[1] La construcción se llevo a cabo en los talleres de *Stomvi*. El tubo debe de tener 20 orificios para poder alcanzar todo el rango espectral.

[2] La propagación en el aire a 15º C es de 340 m/s. La velocidad del sonido en el aire tiene la condición de aumentar en 0,6 m/s por cada grado centígrado de aumento en la temperatura. (Por cada tres grados la entonación cambia tres cents). [4]

Las medidas se han realizado en la cámara de silencio[3] del laboratorio de acústica de la Escuela Politécnica.

Se dispuso de un trombón Stomvi equipado con transpositor; con base en este modelo se fueron cambiando el tipo de tapón o rosca '*clapper*' con el que se embellece y protege el mecanismo exterior y se realizó la medida de la repuesta en impedancia para cada uno. Las distintas situaciones planteadas son:



Los tipos 5 y 6 son dos transformaciones del tipo 1 para realizar una comparación entre las diferencias existentes entre los distintos tipos (masa, forma interior, material) y como afectan al índice acústico del instrumento.

| Tipo y masas | Masa Total (g) |
|---|---|
| 1. *Clapper* (68,9 g) + Campana (22,4 g) | **91,3** |
| 2. *Clapper* (68,9 g) | **68,9** |
| 3. *Clapper* Aluminio (23,2 g) + Campana (22,2 g) | **45,4** |
| 4. *Clapper* Aluminio (23,2 g) | **23,2** |
| 5. *Clapper* (68,9 g) + Masa de plastilina y monedas (22,4 g) | **91,3** |
| 6. *Clapper* (68,9 g) + Masa de plastilina y plomo (58,1 g) | **127,0** |
| 7. Dynamic (102,6 g) | **102,6** |
| 8. Harmon (65,6 g) | **65,6** |
| 9. Sin Tapón (0,0 g) | **0,0** |




## 1.- Análisis de la relación entre los tapones *clapper* y la impedancia del instrumento.

*El cálculo teórico de la impedancia acústica permite determinar las frecuencias propias de la columna del aire a partir de su análisis, lo cual permite establecer los cambios a introducir en el diseño del instrumento así*

[3] El tiempo de reverberación promedio de esta sala es de 0.15 ± 0.05 segundos.

*como en la afinación, entendiendo siempre un sonido mantenido y estable cuando se ejecuta la nota*. [7]

La impedancia acústica es un ejemplo de la función de transferencia de un sistema. Los primeros intentos de medir la función de transferencia[4] del trombón datan de 1968. El estudio se realizó en una sala anecóica con trombonistas profesionales y los resultados fueron sometidos al análisis espectral armónico. Las grabaciones fueron hechas en cinta magnética analógica estéreo de 1/4 de pulgada. En las mediciones hechas en 1972 se asevera el comportamiento del trombón como filtro de paso alto, cuestión que se confirma de forma en el año 2000 con tecnología digital. Fue entones cuando se detecta el fenómeno de propagación no lineal en el trombón, que justifica la formación de una onda de choque si la interpretación se realiza en fortísimo "*ff*", que justifica la fuerza de los armónicos superiores en el trombón (estructura de tubo cilíndrica) frente a lo que ocurre en otro tipo de instrumentos como la trompa o el bombardino de estructura de tubo cónica [2].

En base a estos precedentes, el presente estudio pretende caracterizar el efecto sonoro que causan en el trombón las diferentes resistencias que introducen los tapones del transpositor. El método utilizado para analizar los tapones Stomvi es similar al que se propuso con el *software "BIAS" Brass Instrument Analysis System* (2008) que recoge décadas de experiencia en evaluación de la calidad de los instrumentos de metal. Un resumen sencillo del proceso es determinar la fuerza de las ondas estacionarias que se producen en el instrumento, a mayor respuesta en impedancia acústica, mayor sensación en los labios del intérprete cuanto más fuertes, lo que se traduce en mayor facilidad a la hora de ejecutar la nota musical correspondiente.

Si se tiene en consideración que el máximo exponente en el timbre del sonido del trombón es definido por la forma del instrumento junto con las

[4] La función de transferencia es la descripción matemática de como un sistema (trombón) afecta al paso de algo (el aire) a través del mismo.

características fisiológicas del intérprete[5], se deduce que la aportación de otras particularidades como la boquilla [1][6] [10], el metal de construcción o los tapones del transpositor suponen una aportación de calidad al sonido, por supuesto, pero no tan determinante como a veces se suele afirmar, y que está aún por determinar.

El estudio se ha desarrollado con nueve tapones de los cuales podemos decir que a unos se les supone que aportan resistencias dinámicas (masa) y a otros resonancias en base a la forma (campanillas) como base de la mejora sonora del instrumento. El objetivo prioritario es demostrar si los tapones afectan al sonido del instrumento y por tanto cuál de ellos lo hacía en mayor modo. Si por un lado era más eficiente el que aplicaba resistencias dinámicas al instrumento, o en cambio es mejor, desde el punto de vista musical, el efecto que ofrecen la campanillas, como elementos resonantes, que aportarían un apoyo armónico al timbre.

## RESULTADOS

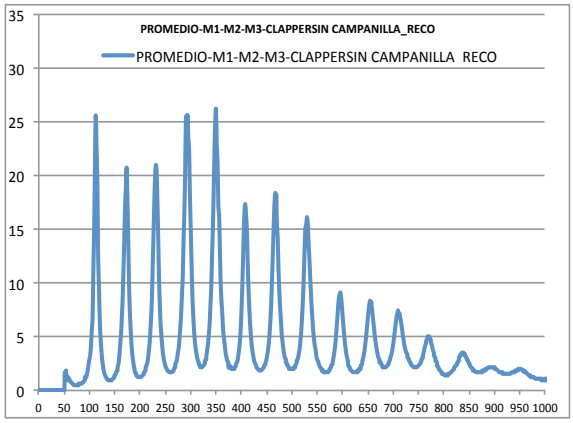
A continuación se presentan los resultados obtenidos en forma tabulada e identificando las notas correspondientes a las frecuencias de resonancia que hemos determinado en el estudio experimental de impedancias realizado. También se presentarán las curvas de respuesta de impedancia según se vaya avanzando en la exposición de las reflexiones y comparativas que componen el texto. Las conclusiones generales que se extraen de la tabla siguiente y que son comunes a todos los trombones son:

- El peso del tapón influye en la impedancia de las frecuencias graves.
- El efecto de los tapones se percibe en el registro central y agudo.
- Los tapones no afectan al registro sobreagudo. Pero si a los armónicos $F_3$ y $Bb_3$ levemente.

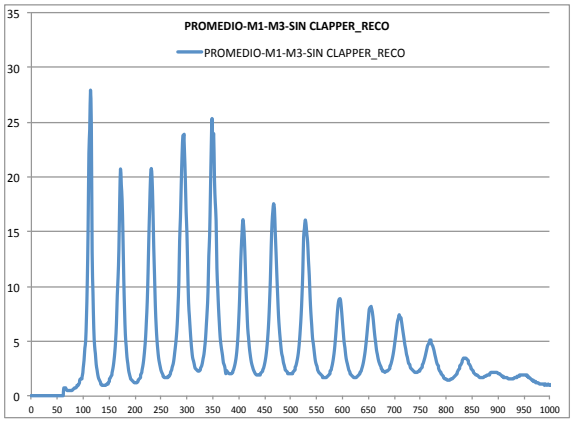
[5] Las resonancias del tracto vocal tienen un fuerte efecto en el tono sonoro. El aparato fonador, la caja de resonancia y los labios son elementos de impedancia que influyen en la formación del sonido. [3]
[6] Estudio que expone la importancia de la boquilla en la formación del sonido.

| PATRÓN Hz- rayl [5] $A_4$ 440 | | $Bb_1$ 58.27 | $Bb_2$ 116.54 | $F_3$ 174.6 | $Bb_3$ 233.1 | $D_4$ 293.7 | $F_4$ 349.2 | $Ab_4$ 415.3 | $Bb_4$ 466.2 | $C_5$ $523_{.3}$ | $D_5$ 587.3 | $E_5$ 659.3 | $F_5$ 698.5 | $G_5$ 784.0 | $Ab_5$ 830.6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| El peso del tapón influye en la impedancia de las frecuencias graves | | | | | | El efecto de los tapones se puede medir en el registro central y agudo | | | | Los tapones no afectan al registro sobreagudo ni a los armónicos F3 y Bb3 en menor modo (frecuencias centrales) | | | | | |
| *CLAPPER* | (Hz) | 54.69 | 115.63 | 173.44 | 231.25 | 290.63 | 350 | 406.25 | 467.19 | 529.69 | 593.75 | 654.69 | 709.38 | 771.88 | 835.94 |
| | (rayl) | 01.61 | 22.40 | 20.09 | 21.15 | 24.64 | 23.31 | 20.43 | 21.91 | 16.49 | 09.37 | 08.42 | 07.38 | 04.90 | 03.50 |
| *CLAPPER* | (Hz) | 53.13 | 112.5 | 173.44 | 231.25 | 293.75 | 350 | 407.81 | 467.19 | 529.69 | 595.31 | 654.69 | 709.38 | 770.31 | 835.94 |
| SIN CAMAPANILLA | (rayl) | 01.80 | 25.59 | 20.74 | 21.00 | 25.64 | 26.17 | 17.35 | 18.38 | 16.13 | 09.05 | 08.33 | 07.40 | 05.04 | 03.50 |
| *CLAPPER* PLATA | (Hz) | 51.56 | 114.06 | 171.88 | 231.25 | 293.75 | 350 | 407.81 | 468.75 | 529.69 | 595.31 | 656.25 | 710.94 | 771.88 | 839.06 |
| | (rayl) | 02.38 | 26.39 | 20.42 | 20.68 | 25.47 | 24.25 | 21.63 | 19.04 | 15.89 | 09.07 | 08.13 | 07.12 | 04.91 | 03.41 |
| *CLAPPER* PLATA | (Hz) | 54.69 | 112.5 | 170.31 | 229.69 | 292.19 | 346.88 | 406.25 | 464.06 | 526.56 | 592.19 | 653.13 | 707.81 | 767.19 | 834.38 |
| SIN CAMAPANILLA | (rayl) | 01.81 | 19.92 | 19.37 | 21.02 | 24.78 | 23.50 | 17.14 | 19.00 | 15.75 | 09.24 | 08.29 | 07.42 | 05.09 | 03.48 |
| *CLAPPER* | (Hz) | 53.13 | 114.06 | 173.44 | 231.25 | 293.75 | 348.44 | 407.81 | 465.63 | 528.13 | 593.75 | 654.69 | 709.38 | 768.75 | 837.5 |
| MONEDAS | (rayl) | 02.54 | 26.05 | 19.48 | 20.25 | 24.99 | 23.36 | 18.35 | 20.33 | 16.33 | 09.17 | 08.24 | 07.37 | 05.14 | 03.49 |
| *CLAPPER* | (Hz) | 51.56 | 114.06 | 173.44 | 231.25 | 293.75 | 348.44 | 410.94 | 468.75 | 532.81 | 598.44 | 657.81 | 715.63 | 773.44 | 842.19 |
| PLOMO | (rayl) | 03.80 | 25.20 | 19.75 | 20.72 | 23.10 | 21.05 | 15.67 | 17.05 | 14.99 | 08.70 | 07.94 | 07.25 | 05.03 | 03.40 |
| DYNAMIC | (Hz) | 54.69 | 112.5 | 173.44 | 229.69 | 292.19 | 350 | 406.25 | 465.63 | 529.69 | 593.75 | 653.13 | 707.81 | 768.75 | 834.38 |
| | (rayl) | 1.76 | 24.59 | 19.75 | 20.52 | 25.02 | 24.51 | 17.05 | 17.58 | 15.90 | 09.36 | 08.44 | 07.52 | 05.27 | 03.50 |
| HARMON | (Hz) | 51.65 | 114.06 | 173.44 | 231.25 | 293.75 | 350 | 407.81 | 467.19 | 529.69 | 595.31 | 654.69 | 709.38 | 768.75 | 835.94 |
| | (rayl) | 02.30 | 24.62 | 21.28 | 20.73 | 28.49 | 22.36 | 16.13 | 18.28 | 16.88 | 09.10 | 08.37 | 07.48 | 05.15 | 03.47 |
| SIN TAPÓN | (Hz) | 62.5 | 114.06 | 171.88 | 231.25 | 293.75 | 348.44 | 407.81 | 467.19 | 528.13 | 595.31 | 654.69 | 709.38 | 770.31 | 835.94 |
| | (rayl) | **0.74** | 27.92 | 20.72 | 20.76 | 23.95 | 25.33 | 16.08 | 17.55 | 16.06 | 08.95 | 08.24 | 07.42 | 05.08 | 03.51 |

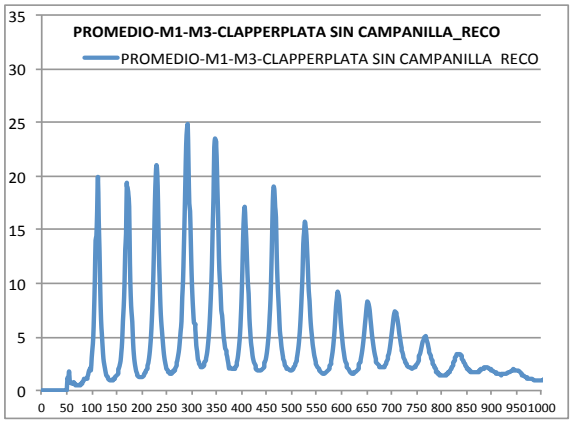
El trombón con el tapón *Clapper,* muestra un índice acústico con una impedancia que fluctúa alrededor de los 20 - 25 rayl y reflejando un decaimiento usual en el registro agudo. Este decaimiento es debido a que el trombón como columna de aire vibrante tiende a amplificar los armónicos superiores en detrimento de la fundamental. Este fenómeno se puede explicar por a formación de una onda de presión es debido al cambio de impedancia, del aire confinado dentro de la tubería, en el paso al aire libre, es decir al cambio de medio. En los graves, al no existir reverberación, las bajas frecuencias radian poco el sonido. Por el contrario, en el registro agudo sucede todo lo contrario puesto que no existe casi reflexión de salida y por lo tanto las frecuencias altas tienen fácil proyección, de ahí que el trombón se considere un filtro de paso alto. En los últimos armónicos, los que están fuera de la frecuencia de corte, el trombón deja paulatinamente de responder a la vibración de los labios, por ausencia de reflexiones, con su consecuente pérdida de impedancia. Es en este punto donde se producen los armónicos responsables del timbre característico del instrumento [7].



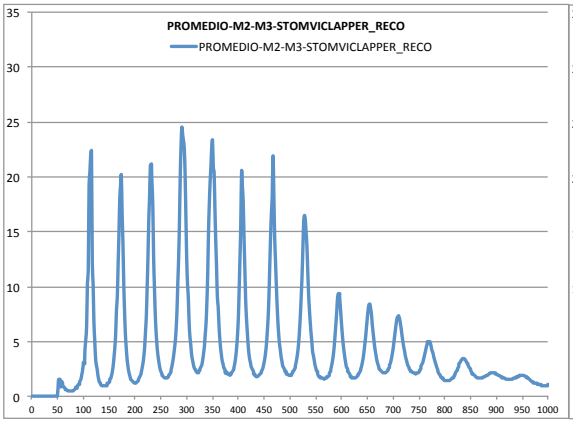

Las diferencias entre el *Clapper* con campanilla y sin ella, resultan poco plausibles. Se evidencia una mayor impedancia y por tanto una mayor resonancia en los armónicos del registro central y agudo, entre el $D_4$ y el $Bb_4$ y el registro grave $Bb_2$ del *Clapper* sin campanilla.

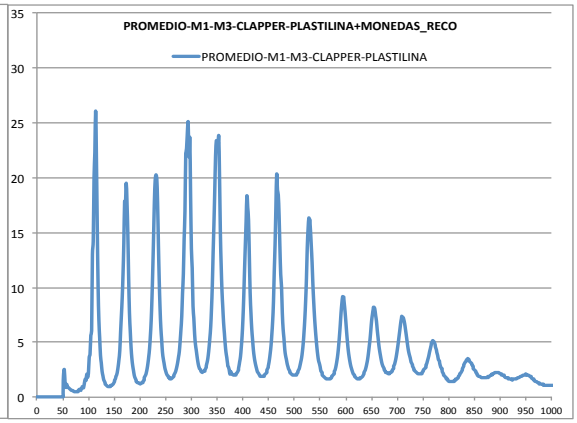


Al comparar el modelo de tapón *Clapper* con el tapón *Clapper* plata (aluminio), los resultados no evidencian ningún cambio relevante en el registro resonante ($Bb_2$,$D_4$-$Bb_4$) al incluir o no la campanilla, pero el *Clapper* plata ofrece una mayor impedancia que los modelos anteriores.



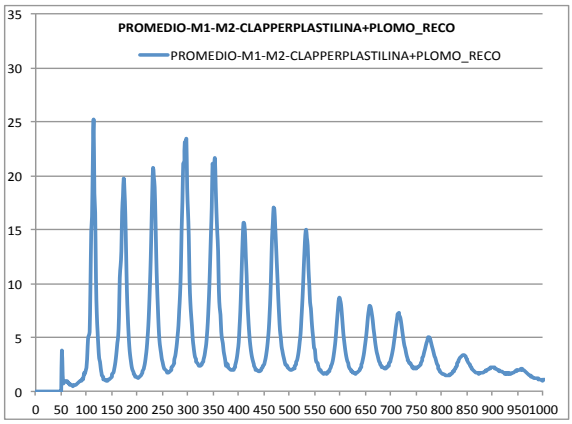

Ante la duda sobre la funcionalidad de la campanilla en los tapones del transpositor del trombón, se substituyó ésta por una masa no rígida en los modelos 5 y 6 citados anteriormente.




El *Clapper* de plastilina y monedas imita el peso del *Clapper* - 91.3 g, para observar las diferencias, si las hubiera, de la impedancia.

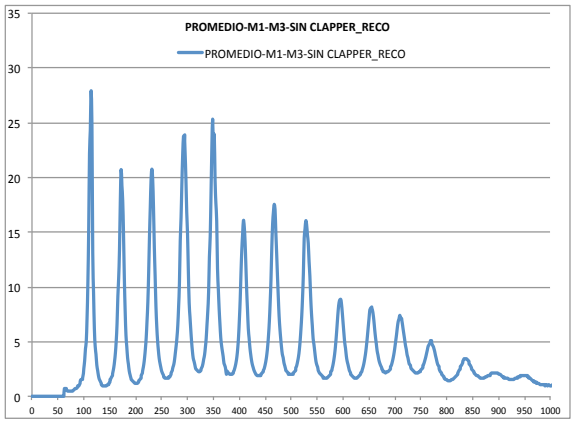
Con el mismo fin, se intenta superar el peso del tapón Dynamic con la premisa de encontrar cambios en la impedancia. Se modifica el peso *Clapper* con la adición de plomo hasta los 127,0 g (una veintena de gramos por encima del Dynamic).



Los resultados arrojan cuánto mínimo una información interesante pues existe una relación directa entre la masa del *Clapper* monedas y el *Clapper* plomo con el incremento de la nota fundamental Bb1, es decir; el incremento del peso del tapón aumenta la impedancia de la nota fundamental, en cambio el beneficio que se consigue en el registro grave no puede ser completado con el el registro armónico donde más actuan los *Clapper* ($Bb_2$, $D_4$-$Bb_4$) puesto que en este registro el aumento de la masa no ha supuesto ninguna evidencia notable, apreciándose un leve detrimento de la impedancia de estos tapones en este registro.

El modelo de tapón Clapper con monedas, que pretende imitar al tapón clapper con campanilla, demuestra que el efecto de la campanilla resulta poco relevante puesto que al ser substituida no demuestra diferencias significativas en la impedancia. Por otro lado, el tapón clapper al que se le ha añadido plomo para superar la masa total del tapón Dynamic, evidencia un cambio en la nota fundamental $Bb_1$, con un notable incremento. Y con un leve detrimento sobre el registro del $F_4$, por tanto el aumento de la masa dinámica en los tapones sí actúa en el registro fundamental del instrumento mientras que mantiene las características del registro agudo con leves cambios.

Si el aumento de la masa dinámica actuaba en la impedancia del armónico fundamental y levemente en los armónicos superiores, tal y como ya se ha citado con los tapones del transpositor *Dynamic* y las pruebas con plomo y monedas, resulta probable que ocurriera, lo contrario, en su proceso inverso, es decir, al quitar peso del transpositor. Para ello primeramente se observaron los resultados del modelo de tapón *Harmon* y por último se quitó directamente el tapón del transpositor. La influencia sobre la nota fundamental resulta evidente, puesto que la impedancia sobre ésta



disminuye. Pero el efecto más notable es que al quitar el tapón del transpositor, existe una mayor disparidad en la impedancia de todo el registro armónico respecto a los patrones de los modelos de tapón anteriores, por tanto:

Se puede afirmar que dentro del registro de aplicación del tapón en el índice acústico y teniendo en cuenta que el tipo de tapón no define el timbre ni resulta determinante o definitivo para el sonido, cabe decir que el tapón sobre el transpositor ayuda a homogeneizar la impedancia en el registro armónico del trombón y por tanto ayuda al músico a conseguir un sonido más homogéneo en todo el registro armónico dentro de las restricciones establecidas.

Los tapones tienen una evidente influencia en las frecuencias correspondientes entre $D_4$ 293.7Hz y $Bb_4$ 466.2Hz Hz, las cuales demuestran una impedancia superior siendo el punto máximo de resonancia en el instrumento. Las frecuencias ascendentes siguientes, muestran un decaimiento paulatino en la impedancia del instrumento lo cual manifiesta que instrumento deja oponer resistencia al paso de la columna de aire vibrante y en consecuencia presenta una menor resonancia[7].

## 2.- Encuesta de opinión sobre los registros del fragmento de una pieza interpretada con el trombón en cada una de las situaciones estudiadas en el apartado anterior.

Se realizó una grabación del fragmento del concertino de David (Ferdinand David Opus nº4) A-B[8] el cual ha sido grabado con todos los tapones presentados en la tabla de impedancias. Para las grabaciones de audio se utilizó un torso biaural de *Head Acoustic* usando su salida digital y la tarjeta de adquisición *SounBlaster-Audigy* y unos auriculares, AKG-K612-Pro, para la audición. La elección de este concertino para trombón de Ferdinand David

[7] La reflexión de la onda es muy importante para controlar junto con los labios la columna del aire. Este requisito se pierde en las notas sobreagudas (fuera de la frecuencia de corte) o extremas puesto que no hay reflexión o muy poca. [9]

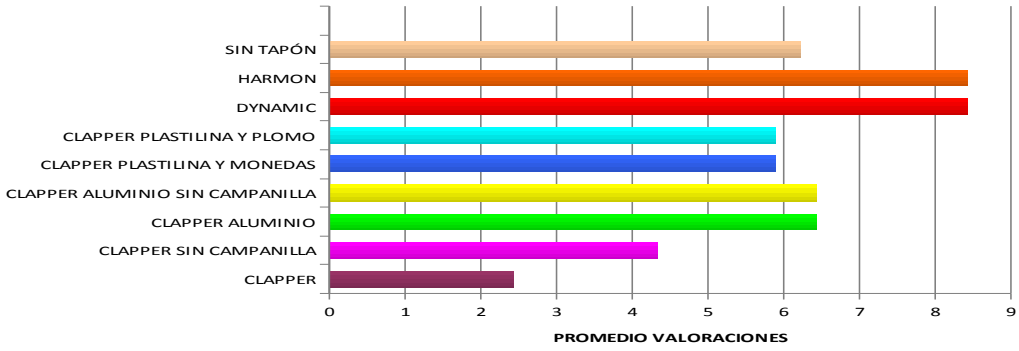
[8] DAVID, Ferdinand. *Konzertino op.4 in Es-Dur für Posaune und Klavier. Arr. Rob. Müller.* Frankfurt: Zimmermman, 2002. Aunque la obra original responde al siglo XIX, esta cita corresponde a la reimpresión editorial de Zimmermann del 2002.

dedicado al virtuoso del trombón de varas Carl Queisser[9], se debe al gran registro sonoro que abarca, el cual se identifica perfectamente con el campo de acción de las mayores impedancias de los tapones del transpositor.

Este set de grabaciones se reprodujo a nueve trombonistas profesionales, presentándoles los audios a través de los auriculares y sin que supieran cuáles eran las condiciones de grabación (Tipo de *clapper*). Al terminar la audición se somete a una serie de preguntas y cuestiones para que expresen sus sensaciones desde el punto de vista musical, y para finalizar se les pide que valoren cada uno de los ejemplos escuchados, ordenándolos de mejor opinión a peor.

## RESULTADOS

El siguiente gráfico muestra la valoración promedio con los máximos de preferencia en base a una encuesta realizada a profesionales del ámbito del trombón.




| TIPO | PROF-1 | PROF-2 | PROF-3 | PROF-4 | PROF-5 | PROF-6 | PROF-7 | PROF-8 | PROF-9 | PROMEDIO | σ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CLAPPER | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | **2.4** | 0.7 |
| CLAPPER SIN CAMPANILLA | 4 | 5 | 7 | 3 | 3 | 9 | 2 | 3 | 3 | **4.3** | 2.3 |
| CLAPPER ALUMINIO | 7 | 6 | 6 | 5 | 8 | 10 | 7 | 5 | 4 | **6.4** | 1.8 |
| CLAPPER ALUMINIO SIN CAMPANILLA | 7 | 6 | 6 | 5 | 8 | 10 | 7 | 5 | 4 | **6.4** | 1.8 |
| CLAPPER PLASTILINA Y MONEDAS | 8 | 2 | 5 | 7 | 5 | 7 | 6 | 7 | 6 | **5.9** | 1.8 |
| CLAPPER PLASTILINA Y PLOMO | 2 | 3 | 3 | 8 | 10 | 8 | 5 | 6 | 8 | **5.9** | 2.8 |
| DYNAMIC | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 6 | 4 | 9 | 10 | **8.4** | 2.2 |
| HARMON | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 4 | 10 | 8 | 9 | **8.4** | 1.7 |
| SIN TAPÓN | 6 | 8 | 4 | 6 | 4 | 3 | 8 | 10 | 7 | **6.2** | 2.3 |

Resultados individuales y desviación típica de cada encuesta

[9] On-line trombone Journal: www.trombone.org. David Guion. Acceso el 02-06-2015.

Vemos en la valoración subjetiva y personal de los profesionales del sector que las preferencias se decantan del lado de la masa añadida por el tapón en el transpositor en detrimento de las campanas de los *Clapper* que pretenden aumentar los armónicos del instrumento. En un estudio complementario realizado en la cámara de silencio anteriormente citada, se ha actuado sobre las campanas para analizar su espectro armónico, encontrando que su frecuencia de resonancia fundamental está alrededor de los 4000Hz, que se encuentra totalmente alejada de las frecuencias de resonancia naturales del trombón de varas. Este puede ser un motivo por el que la campana del *Clapper* quizás no actúe como se preveía.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. AGULLÓ, J. Acústica Musical. Barcelona: Prensa Científica S.A. 1989. Estudio que expone la importancia de la boquilla en la formación del sonido.

[2]. BEAUCHAMP, J. Trombone Transfer Functions: Comparison between Frequency-Swept Sine Wave and Human Performer Input. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.

[3]. FREOUR, V. Acoustical properties of the vocal-tract in trombone performance. Aalborg, 2011

[4]. DE OLAZABAL, T. Acústica musical y Organología. Buenos Aires: Ricordi, 1993, p.29.

[5]. HARTMANN, W.M. *Principles of Musical Acoustics, Undergraduate Lecture Notes in Physics.* New York: Springer Science+Business, 2013

[6]. ISO10534-2:1998 - *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.* Madrid: AENOR, 2002.

[7]. MARTÍNEZ MIRALLES, J. *Contribució a l'estudi de l'acustica de la Tenora i del tible en el domini temporal.* Barcelona: Universitat Politécnica de Catalunya, 1987.

[8]. KEMP J. A. and SMITH. R. A. *Measuring the effect of the reflections sound from lips in brass musical instruments.* Société Française d'Acoustique. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00811175/document.

[9]. PIERCE, J. *Los sonidos de la música*. Barcelona: Labor, 1985.

[10]. VEREECKE, H.W. The Trombone of Anton Schnitzer the Elder in Verona: A Survey of Its Properties and Their Acoustical Significance. Wien:Historic Brass Society Journal 23, 25-42.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ONVIRTUAL
ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DEL P-BONE (PLASTIC TROMBONE) FRENTE A OTROS TROMBONES DE SU MISMA TESITURA FABICADOS EN METAL

PACS:43.66.Jh

Esteve Rico, Juan Carlos; Vera Guarinos, Jenaro

Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal.

EPSA - Universidad de Alicante-Campus de San Vicente del Raspeig.

Email: estevejuancarlos@yahoo.com; jenaro@ua.es;

## ABSTRACT

In this study are presented the objective results of the impedance response of some trombones in order to find their sound and timbre differences based on acoustic impedance curves. The results are also compared with the opinions included in an objective survey about the subjective evaluation after hearing a music passage recorded with everyone of the instruments. The results show that the impedance form and the sound goodness average are correlated. An irregular performance is detected, both in the experiment and in the survey of one of the trombones that was subjected to an ultrasound bath cleaning in this year.

Furthermore, it is known that the sound quality of the P-Bone makes it ideal as an initiation instrument in the trombone learning.

## KEYWORDS

Trombone, *P-bone,* acoustic impedance, harmonic, sound, timbre, uniformity, ultrasound,

## RESUMEN

Se presentan los resultados objetivos de la respuesta en impedancia de varios trombones con la intención de descubrir sus diferencias en sonoridad y timbre en base al aspecto de sus curvas de resonancia. También se comparan los resultados con las opiniones recogidas en una encuesta objetiva sobre la apreciación subjetiva de la audición de un pasaje musical grabado para la ocasión con cada uno de los instrumentos. Los resultados presentan suficiente correlación entre la forma de la impedancia y las calificaciones de bondad sonora promedio. Se detecta cierto comportamiento irregular, tanto en la parte experimental como en la encuesta, de uno de los trombones que ha sido sometido a una limpieza por baño de ultrasonidos en el último año.

Al mismo tiempo se encuentra que la calidad sonora del *P-Bone* le hace idóneo para el estudio como instrumento de iniciación

PALABRAS CLAVE: Trombón, *P-Bone*, impedancia acústica, armónicos, sonoridad, homogeneidad, timbre, ultrasonidos.

## INTRODUCCIÓN

El trombón de varas es un instrumento sencillo, una columna de aire vibrante en el interior de una tubería, sobre el que existe una pregunta ancestral debido a la dualidad en sus opiniones. Desde la perspectiva de la ciencia física, resulta casi irrelevante la influencia sonora que desarrolla el material de construcción del tubo que contiene la columna de aire vibrante, puesto que la principal característica del sonido del trombón está en la forma del tubo que la contiene. En cambio, desde el punto de vista de la práctica musical y en el ámbito profesional de los instrumentistas de viento metal, se insiste en renegar, de forma generalizada, sobre la poca relevancia que la ciencia otorga al material de construcción, alegando sensaciones diferentes en la ejecución interpretativa según el material que contenga la masa de aire vibrante.

En base a este postulado en el presente estudio se ha planteado un análisis en dos fases que aborda esta problemática y con el que se pretende llegar a una conclusión. Para ello primeramente, se ha desarrollado una experiencia en el laboratorio para medir la impedancia de un trombón de plástico y otros trombones, de diferentes materiales y calidades, que se encuentran en el mercado. En la segunda parte del estudio, expertos intérpretes han llevado a cabo una cata a ciegas de los trombones analizados con la finalidad de evaluarlos.

## MATERIAL Y MÉTODO

Para la determinación de la respuesta en impedancia del trombón, se usa un tubo de impedancia[7]. Aparte de que debe tener las dimensiones transversales adecuadas y debido a que el rango de frecuencias de este instrumento se encuentra entre 50 y 1000 Hz aproximadamente, se tuvo que construir un modelo específico a medida del problema[1], al

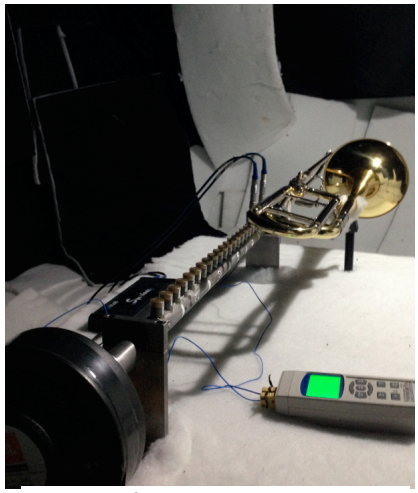


**Ilustración 1- tubo de impedancia**

[1] La construcción se llevo a cabo en los talleres de *Stomvi*. El tubo debe de tener 20 orificios para poder alcanzar todo

cual se le ha añadido un amplificador de potencia y una fuente de ruido *Brüel&kjær,* un motor de agudos JBL de 2", dos micrófonos *Grass 1/4"* con preamplificador y prepolarizados a 200V. Estos se desplazaban a lo largo de las del tubo de impedancia (se necesitó usar una combinación de 20 posiciones).

El sistema de adquisición de datos que se ha utilizado es *01dB "Symphonie"* con *la suite dBFA32*, mientras que para el post procesado se ha recurrido a los programas *software Acupro* y *Microsoft Excel.*

Se ha tenido especial cuidado en cuanto a: posición del instrumento, bombas de afinación, tuberías sin agua ni suciedad, la temperatura del aire[2] y a que nada obstaculizara ni reflejara la salida del sonido por la campana.

Para llevar a cabo las grabaciones de audio se utilizo un torso biaural de Head Acoustic usando su salida digital y la tarjeta de adquisición SounBlaster-Audigy. Y unos auriculares, Sennheiser HD-380 Pro, para la audición.

Las medidas se han realizado en la cámara de silencio[3] del laboratorio de acústica de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alicante. Se dispuso de seis trombones de diferentes gamas y precios que fueron tomados aleatoriamente, excepto el *P-Bone*, como modelos para el análisis comparativo de la impedancia. Las distintas situaciones planteadas son:

- Bach 42- HagmannSib/fa
- Yamaha YSL 354 Sib (tubería estrecha)
- Conn 88H Sib/Fa
- Júpiter 636 Sib/fa
- Stomvi maestro-Dynamic- Sib/fa
- P-Bone(Tubería estrecha)



**Ilustración 1-*P-Bone***

[2] La propagación en el aire a 15º C es de 340 m/s. La velocidad del sonido en el aire tiene la condición de aumentar en 0,6 m/s por cada grado centígrado de aumento en la temperatura. (Por cada tres grados la entonación cambia tres cents). [3]

[3]El tiempo de reverberación promedio de esta sala es de 0.15 ± 0.05 segundos.

## 1.- Análisis de la relación entre el *P-Bone* y la impedancia de los distintos instrumentos.

Si el metal influye o no, parece una pregunta de connotaciones apócrifas para muchos expertos instrumentistas. El metal de construcción es muy venerado en la cultura musical, especialmente en el sector de los instrumentos de viento-metal. Pero para responder a ello es necesario recurrir al proceso primario de vibración que define el fenómeno sonoro. Los instrumentos de viento metal son columnas de aire vibrantes[4], por tanto y al igual que ya hemos indicado en otro trabajo[5]:

… *el máximo exponente en el timbre del sonido del trombón es definido por el aire vibrante confinado en el interior del instrumento, por la forma del instrumento junto con las características fisionómicas del intérprete*[6]*, por la aportación de otras particularidades como la boquilla*[7]*, y finalmente por el metal de construcción. Es decir, de todas las particularidades que pueden influir en el sonido, el metal de construcción aporta el porcentaje menor*…

Cada músico tiene un sonido característico, es como el fenómeno de la voz por el que se le reconoce sin necesidad de contacto visual, y esto no es debido al metal si no a las características fisiológicas de cada uno.

Aunque este trabajo no contempla directamente los dilemas que puede plantear el tipo de aleaciones que se usan en la construcción de trombones habitualmente, y como el tema central de la controversia de nuestro estudio toma como referente un trombón heterodoxo fabricado en su totalidad de plástico (P-Bone), esperando que algún día dispongamos de una mayor cantidad de información sobre el plástico como material de fabricación de instrumentos de viento, pasamos a enumerar una serie de opiniones que los estudiosos han vertido sobre el tema del susodicho metal:

---

[4] WEBER, Karlheinz. *die Posaune einluftklinger,* accesible en: http://karlheinzweber.de, acceso el 09/06/15

[5] *Estudio de la Influencia de la Masa Dinámica del Transpositor de un 'Trombón de Varas' en Función de su Espectro de Impedancia Acústica*

[6] *Las resonancias del tracto vocal tienen un fuerte efecto en el tono sonoro.* [12]
*El aparato fonador, la caja de resonancia y los labios son elementos de impedancia que influyen en la formación del sonido.*[8]

[7] Se puede profundizar más sobre la importancia de la boquilla en la formación del sonido en [1] y [5].

- *"La elección del material con finalidad estética no tiene siempre una relación clara sobre el sonido puesto que hay metales que no afectan en gran manera la percepción del sonido, sobre este principio se mueven las diferentes hipótesis a la hora de decorar los instrumentos"*. [4]

- El material no cambia el timbre del sonido (aunque parece acentuar las frecuencias altas). [9]

- El material que radia el sonido se encuentra alrededor del final de la campana aproximadamente. [9].

- Existe una relación entre el material que vibra y el sonido que transmite la columna del aire. [9].

- "*La Deformación elástica de la pared de metal, que es proporcional a la presión sonora oscilante dentro del instrumento, podría proporcionar una explicación de los cambios observados en la impedancia de entrada y los cambios en las funciones de transferencia*". [9].

- La columna de aire hace entrar en vibración al metal que la contiene, especialmente en la parte cónica la campana, por tanto, se puede afirmar que la radiación sonora de la campana forma parte del sonido en la interpretación. [9].

- Las paredes del instrumento que confinan la columna del aire tienen relación con la formación del sonido. [9].

## RESULTADOS

Se procedió a comparar diferentes trombones de diferentes precios y calidades con el objetivo de poder apreciar las afirmaciones anteriormente citadas.
Los resultados de la impedancia han sido analizados en base a los resultados

que mostramos en la tabla de la siguiente página. Además se muestran de forma individualizada las correspondientes curvas de la respuesta en impedancia.

El objetivo es facilitar la comprensión de los resultados de las medidas y así observar cuál de los trombones puede perfilar un registro sonoro más homogéneo ( de mayor calidad) de manera objetiva.

Las primeras ideas que nos fuimos formando al ir desarrollando la parte experimental era que las diferencias encontradas, para todos los trombones, en el registro grave son sutiles, puesto que el trombón las atenúa al ser un filtro de paso alto. Es por eso que:

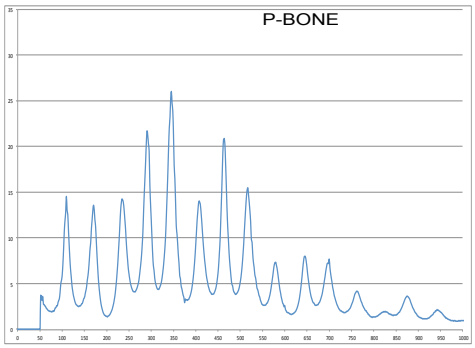
- En las frecuencias superiores a la fundamental se encuentran grandes cambios según el modelo de trombón.
- Resulta evidente que en el registro medio-agudo de los instrumentos se dan las impedancias más elevadas y en consecuencia el sonido se aprecias más vigoroso.
- Al acercarnos a la frecuencia de corte; las impedancias empiezan a uniformizarse dado que el instrumento deja de oponer resistencia al paso del flujo del aire. Es en este punto donde se producen los armónicos responsables del timbre característico del instrumento[8].
- Fuera de la frecuencia de corte sobreaguda los trombones no muestran grandes diferencias entre sí con excepción de algunos picos. [10]

A continuación se muestra la tabla sobre la que realizamos un análisis minucioso sobre cada frecuencia de interés.

[8] *La reflexión de onda es muy importante para controlar junto con los labios la columna del aire. Este requisito se pierde en las notas sobreagudas (fuera de la frecuencia de corte) o extremas puesto que no hay reflexión de onda o muy poca.* [11]

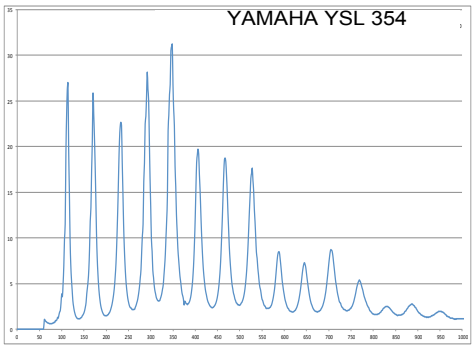
# TABLA DE RESULTADOS

| [6] PATRÓN Hz-rayl $A_4$ 440 | $Bb_1$ 58.27 | $Bb_2$ 116.54 | $F_3$ 174.6 | $Bb_3$ 233.1 | $D_4$ 293.7 | $F_4$ 349.2 | $Ab_4$ 415.3 | $Bb_4$ 466.2 | $C_5$ 523.3 | $D_5$ 587.3 | $E_5$ 659.3 | $F_5$ 698.5 | $G_5$ 784.0 | $Ab_5$ 830.6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Las diferencias en el registro grave son sutiles puesto que el trombón las atenúa al ser un filtro de paso alto | | Las frecuencias superiores a la fundamental denotan grandes cambios según el modelo | | | En el registro medio-agudo de los instrumentos se dan las impedancias más grandes y en consecuencia las notas más fuertes | | | Al acercarnos a la frecuencia de corte las impedancias em-piezana parecerse | | Fuera de la frecuencia de corte sobreaguda los trombones no muestran grandes diferencias entre sí con excepción de algunos picos | | | | |
| BACH42 (Hz) | 54.69 | 114.06 | 175 | 231.25 | 295.31 | 350 | 409.38 | 473.44 | 526.56 | 589.06 | 656.25 | 707.81 | 767.19 | 837.5 |
| (rayl) | 01.58 | 15.01 | 14.24 | 17.94 | 19.69 | 22.52 | 16.74 | 17.29 | 18.82 | 10.02 | 09.05 | 06.70 | 04.07 | 02.69 |
| YAMAHA YSL 354 (Hz) | 60.94 | 114.06 | 170.31 | 232.81 | 292.19 | 348.44 | 406.25 | 467.19 | 528.13 | 587.5 | 654.69 | 704.69 | 768.75 | 829.69 |
| (rayl) | 01.08 | 26.93 | 25.87 | 22.66 | 28.16 | 31.25 | 19.72 | 18.74 | 17.64 | 08.48 | 04.33 | 08.72 | 05.39 | 02.50 |
| CONN 88S (Hz) | 51.56 | 110.94 | 171.88 | 232.81 | 296.88 | 350 | 409.38 | 473.44 | 531.25 | 595.31 | 657.81 | 710.94 | 773.44 | 840.63 |
| (rayl) | 00.84 | 21.77 | 17.60 | 19.63 | 26.19 | 26.03 | 24.00 | 18.49 | 17.19 | 09.62 | 08.06 | 07.50 | 04.62 | 02.54 |
| JÚPITER636 (Hz) | 56.25 | 112.5 | 171.88 | 231.25 | 292.19 | 348.44 | 410.94 | 471.88 | 528.13 | 595.31 | 659.38 | 710.94 | 771.88 | 839.06 |
| (rayl) | 01.18 | 28.91 | 22.60 | 21.73 | 29.82 | 21.75 | 15.55 | 16.52 | 15.28 | 09.34 | 08.99 | 06.56 | 04.41 | 02.91 |
| STOMVI-DYNAMIC (Hz) | 53.13 | 114.06 | 173.44 | 231.25 | 293.75 | 348.44 | 407.81 | 465.63 | 528.13 | 593.75 | 654.69 | 709.38 | 768.75 | 837.5 |
| (rayl) | 02.54 | 26.05 | 19.48 | 20.25 | 24.99 | 23.36 | 18.35 | 20.33 | 16.33 | 09.17 | 08.24 | 07.37 | 05.14 | 03.49 |
| P-BONE (Hz) | 51.56 | 109.38 | 170.31 | 234.38 | 290.63 | 345.31 | 407.81 | 464.06 | 517.19 | 578.13 | 645.31 | 696.88 | 762.50 | 823.44 |
| (rayl) | 03.71 | 14.54 | 13.58 | 14.27 | 21.73 | **26.04** | 14.05 | 20.86 | 15.47 | 07.30 | 08.01 | 07.25 | 04.15 | 01.93 |

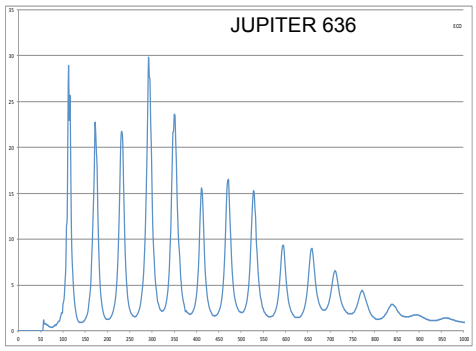



Al comparar el índice acústico del los diferentes trombones cabe afirmar que en la frecuencia fundamental $Bb_1$, los trombones no muestran grandes cambios de impedancia, a excepción del *P-Bone*. En todos los registros que el *P-Bone* iguala o supera el resto de instrumentos significará que su resonancia y facilidad para impostar es parecida al resto de los trombones y tendrá más facilidad para sonar. Resulta destacable como este modelo de trombón es capaz de sacar una leve impedancia en el registro donde el trombón deja ya casi de responder al paso del aire 823.44Hz ($Ab_6$). Esta característica es compartida con el Yamaha YSL 354.

El trombón Yamaha destaca especialmente con las impedancias más potentes a los largo del registro $Bb_2$ –$F_4$, lo cual evidencia una sonoridad muy potente, causa del conocido efecto del sonido "rajado" como consecuencia del exceso de radiación al que puede ser sometida la campana, este efecto merece sin duda un mayor análisis en profundidad que será abarcado en siguientes estudios.

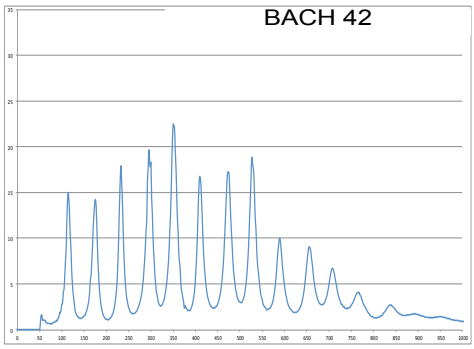


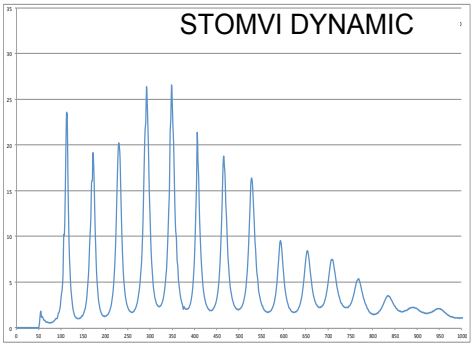

La octava próxima, $Bb_3$-$Bb_4$, es sin duda en la que mayores impedancias se pueden observar en todos los trombones, es por tanto el registro más resonante del trombón y sobre el cual se debe prestar más atención para encontrar el trombón que nos ayude a homogeneizar el registro. Las fuertes resonancias de los trombones Yamaha y Júpiter son muy apropiadas para el registro pero aportan sin duda un timbre más claro debido a la radiación de la campana (¿?). En principio, el trombón Yamaha tiene un gran control sobre la gama dinámica y la igualdad sonora. Sería muy

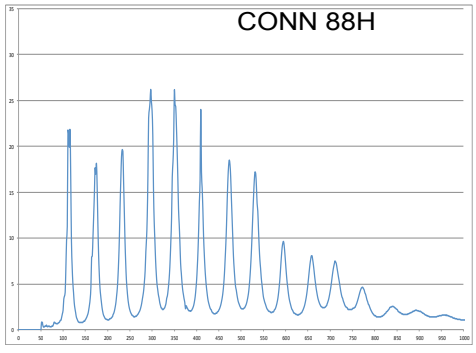


interesante poder comprobar la calidad del modelo superior de Yamaha el "Xeno", el cual tiene mayor peso y es capaz de controlar el "efecto rajado".

Resulta muy extraño la evidente similitud entre el trombón Bach42 y el *P-Bone,* a este respecto cabe matizar que el Bach42 fue sometido a una limpieza con ultrasonidos poco antes de realizar estas experiencias. Personalmente, ya que es mi instrumento habitual, había apreciado una gran diferencia a la hora de impostar el sonido antes y después de la limpieza. Ahora se ha comprobado objetivamente: la impedancia demuestra que el trombón Bach42, resulta muy poco resonante en comparación con los demás. Este principio me lleva a postular que los ultrasonidos pueden afectar la estructura de los instrumentos y por tanto pueden ser dañinos. No es normal que un instrumento de alta gama responda con impedancias similares a las del *P-Bone.* Este hecho pretende ser estudiado en posteriores experiencias y para ello será necesario medir nuevamente el trombón sometido a ultrasonidos y comparar resultados con el mismo modelo de instrumento que no haya sido limpiado con de esa forma. En definitiva, si eliminamos, entre comillas, el trombón Júpiter y Yamaha por el efecto rajado, y los trombones Bach42 y



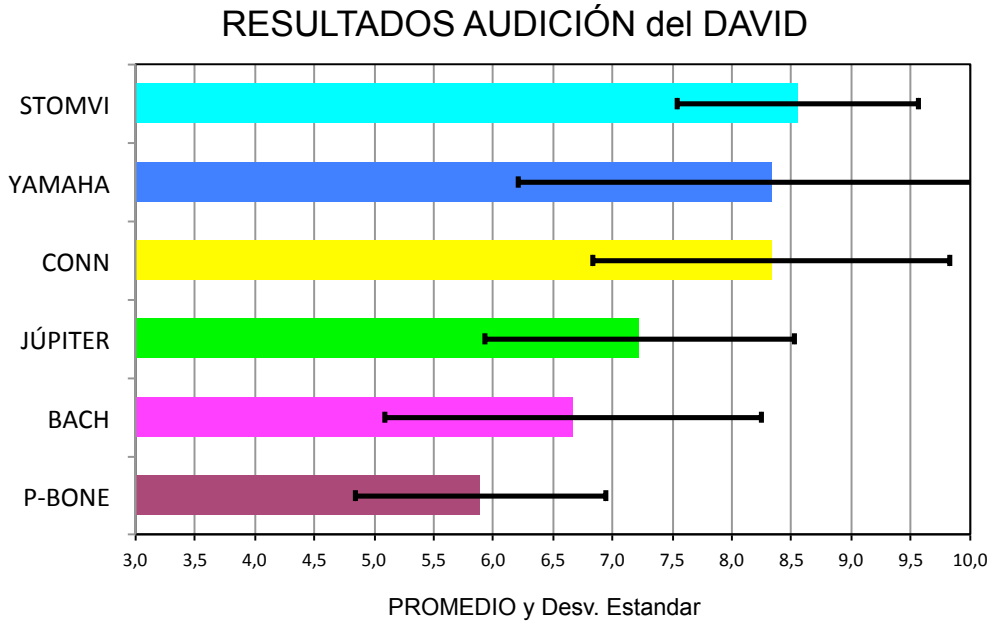

P-Bone, por su menor impedancia y resonancia, entonces: los trombones Conn 88H y Stomvi Dynamic son los que pueden ofrecer a los trombonistas una mayor homogeneidad en el registro sonoro de los trombones analizados. Estos hechos nos permite aventurar que los resultados de las encuestas tendrían que decantarse por estos modelos. Veamos a continuación lo que sucede.

**2.- Encuesta de opinión sobre los registros del fragmento de una pieza interpretada con el trombón en cada una de las situaciones estudiadas en el apartado anterior.**

Se ha realizado una grabación del fragmento del concertino de David (Ferdinand David Opus nº4) A-B[9] el cual ha sido grabado con todos los trombones presentados en la tabla anterior. Para las grabaciones de audio se utilizó un torso biaural de *Head Acoustic* usando su salida digital y la tarjeta de adquisición *SoundBlaster-Audigy* y unos auriculares, AKG-K612-Pro para la audición.

La elección de este concertino para trombón de Ferdinand David dedicado al virtuoso del trombón de varas Carl Queisser[10] se debe al gran registro sonoro que abarca, el cual se identifica perfectamente con el campo de acción de las mayores respuestas en impedancias de los trombones.

En la siguiente gráfica se recogen las opiniones de profesionales en un intento de aunar realidad musical con la objetividad de la experimentación. Resulta muy evidente que los trombonistas buscan instrumentos que ayuden a homogeneizar el registro sonoro.




[9] Aunque la obra original responde al siglo XIX, esta cita corresponde a la reimpresión editorial de Zimmermann del 2002. [2]

[10] On-line trombone Journal: www.trombone.org. David Guion. Acceso el 02-06-2015.

Pero del mismo modo, existe una cierta predilección hacia los instrumentos con grandes impedancias muy especialmente en el registro agudo, los cuales suman notas muy brillantes y que aportan mucho a la sonoridad del instrumento gracias al timbre de sus armónicos sobreagudos.

El trombón de calidad Bach42 ha sido muy mal valorado, lo cual añade valor a los resultados obtenidos para la impedancia, se sitúa a la altura de las impedancias del P-Bone, lo cual confirma que ambos instrumentos tienen un registro sonoro desigual y menos resonante en comparación a los otros modelos analizados.

Ante la expectativa que suscita el título de la ponencia: "*Análisis comparativo de la impedancia acústica del P-Bone (plastic-trombone) frente a otros trombones de su misma tesitura fabricados en metal*", pensamos que el *P-Bone* no puede tener la misma calidad sonora que los instrumentos de metal, que son el resto y que presentan grandes impedancias y/o registros homogéneos, pero sin duda, es un instrumento en el que la columna de aire vibrante ofrece armónicos de suficiente calidad.

Los resultados pueden servir, en primera aproximación, para dar cierto valor al metal en la construcción del instrumento, El P_Bone ha perdido. Pero no hemos de perder de vista que la calidad de la sonoridad del instrumento percibida, es responsabilidad de:

- El instrumentista principalmente.
- La boquilla que mejor se adapte a la fuente generadora, los labios.
- La radiación del metal en una proporción menor.

Por tanto, cada vez que se intente comparar los resultados de una interpretación hecha con instrumentos fabricados con distintos metales, se debe recordar el porcentaje que este aporta al sonido final respecto al resto de ítems.

Otra conclusión que podemos hacer indirectamente, a la vista del comportamiento del *P*-Bone, es que se le debe tener en consideración como instrumento de aprendizaje básico para el primer curso de las Enseñanzas Elementales de música, puesto que tal y como se ha comprobado es un instrumento que puede sonar con calidad y resulta muy cómodo por el peso para los niños que inician los estudios musicales a la edad aconsejada de 7 años. Además resulta muy fácil de manejar y transportar. No obstante, se le debería usar con una boquilla de metal que se puede adecuar mejor a la fisionomía de los alumnos, puesto que existe mayor variedad.

Finalmente me gustaría plantear una reflexión que todos los músicos deberían hacerse alguna vez:

En el inicio de los estudios musicales el tipo de instrumento con el que se practica así como sus características sonoras, vienen impuestas por el profesor, el gusto estético o la casualidad. Este principio marcará la memoria muscular de cada instrumentista de viento-metal, la cual se adaptará al esfuerzo y sonoridad, para finalmente ser calificada, por la fuerza de la costumbre o hábito, por cada uno como “normal”. Este será el punto de partida en la vida del músico y todos los instrumentos futuros serán comparados, inconscientemente, con nuestra experiencia previa y el esfuerzo muscular aprendido. Este principio teórico justifica todos los cambios y sensaciones que se sienten al probar algo distinto a lo habitual, pero no significa que el cambio se deba totalmente al metal de construcción del nuevo instrumento, ni a la nueva marca, o a la dificultad de impostar el sonido, ni si quiera a que pueda “estar sordo” tal y como se llega a afirmar en muchas ocasiones en el argot musical. Sino que simplemente son sensaciones que difieren a nuestra experiencia previa pero que a buen seguro no son percibidas, de igual forma, por otros instrumentistas de metal con experiencias diferentes.

Para finalizar se puede decir que aquellos trombones cuyas curvas de impedancia parecen más equilibradas (Conn y Stomvi) también tienen su correspondencia en las respuestas a la audición.

Por otra parte Yamaha con bastante ventaja (compitiendo con Stomvi) y Jupiter quedan en un segundo puesto pero a veces muy bien valorados por su brillo y riqueza en agudos. Este hecho es significativo si comparamos precios.

En el grupo de menor calidad tenemos a un Bach de gama alta y al *P-Bone* de gama baja. Del primero ya hemos intentado dar una justificación por la cuestión de los ultrasonidos. Al segundo solamente podemos darle la enhorabuena pues sus resultados han sido sorprendentes, en alguna de las encuestas destacó de forma notoria frente a las grandes marcas.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. AGULLÓ, J. *Acústica Musical.* Barcelona: Prensa Científica S.A. 1989.

[2]. DAVID, F. *Konzertino op.4 in Es-Dur für Posaune und Klavier. Arr. Rob. Müller.* Frankfurt: Zimmermman, 2002.

[3].DE OLAZABAL, T. Acústica musical y Organología. Buenos Aires: Ricordi, 1993, p.29.

[4]. FLETCHER, N. & ROSSING, T. *The Physics of Musical Instruments.* New York: Springer, 1998, p. 730-731

[5]. FREOUR, V. *Acoustical properties of the vocal-tract in trombone performance*.Aalborg, 2011.

[6]. HARTMANN, W.M. *Principles of Musical Acoustics, Undergraduate Lecture Notes in Physics*. New York: Springer Science+Business, 2013

[7].ISO10534-2:1998 - *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.* Madrid: AENOR, 2002.

[8]. KEMP J. A. and Smith R. A.. *Measuring the effect of the reflections sound from lips in brass musical instruments.* Nantes: SociétéFrançaised'Acoustique, 2012

[9]. KAUSEL, W. *Influence of Wall vibrations on the sound of brass wind instruments.* Wien: Universität für musik und darstellende Kunst Wien, 2010, p.13

[10]. MARTÍNEZ MIRALLES, J. *Contribució a l'estudi de l'acustica de la Tenora i del tible en el domini temporal.* Barcelona: Universitat Politécnica de Catalunya, 1987.

[11]. PIERCE, J. *Los sonidos de la música.* Barcelona: Labor, 1985

[12]. VEREECKE, H. W. *The Trombone of Anton Schnitzer the Elder in Verona: A Survey of Its Properties and Their Acoustical Significance. Wien: Historic Brass Society Journal 23, 25-42.*

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ESTUDIO DE LA CALIDAD SONORA DEL FLABIOL Y LA DULZAINA

PACS: 43.75.Ef

Poveda Martínez, Pedro; Ramis Soriano, Jaime
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante.
Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.
Tel. 96 590 34 00
Fax. 96 590 34 64
Email: pedro.poveda@ua.es; jramis@ua.es

## ABSTRACT

The *dulzaina* and the *flabiol* are traditional wind instruments used throughout all the Spanish geography. The first one is part of the family of Oboe while the second is related to the family of recorders. These instruments are traditionally manufactured of wood, using for that purpose different types like maple, rosewood or granadillo. The typology and quality of the construction elements significantly affect the acoustic characteristics of the instrument. This study examines the sound quality of the flabiol and the dulzaina depending on the material used on their manufacturing.

## RESUMEN

La dulzaina y el flabiol son instrumento de viento tradicionales cuyo uso se extiende por toda la geografía española. El primero de ellos se enmarca dentro de la familia del oboe, mientras que el segundo está relacionado con la familia de las flautas de pico. La fabricación de estos instrumentos se realiza tradicionalmente en madera, empleando para ello distintos tipos como el arce, el palosanto o el granadillo. La tipología y calidad de los elementos constructivos del instrumento afectan de manera considerable a sus características acústicas. Este trabajo muestra un estudio de la calidad sonora del falbiol y la dulzaina en función del material de construcción empleado.

## INTRODUCCIÓN

Cada instrumento musical presenta un espectro de frecuencias característico, formado por multitud de armónicos que le confieren un timbre característico de la familia a la que pertenecen. Los materiales de construcción empleados en su fabricación afectarán al sonido producido, siendo sus propiedades mecánicas las que determinen los modos de vibración del instrumento y por tanto, las frecuencias excitadas. De este modo, instrumentos con la misma forma y disposición pueden llegar a tener diferentes matices en su timbre debido al material empleado en su fabricación. Este fenómeno se acentúa al tratar con maderas al tratarse de un material ortótropo cuyas propiedades varían en cada dirección. Este fenómeno, añadido a las diferencias

existentes en la cantidad de mosto en el interior de la madera, hace que la misma especie pueda comportarse de diferentes formas. Un claro ejemplo de este fenómeno lo encontramos en instrumentos de cuerda, donde los modos de vibración de tapa y fondo se ven claramente alterados por el material utilizado.

Tradicionalmente, instrumentos como la dulzaina y el flabiol han sido fabricados con maderas nobles, que aportaban un sonido bueno y estabilidad tanto mecánica como acústica al instrumento. Actualmente, la escasez de algunos tipos de madera, el incremento del coste y la mejora de los procesos de fabricación han hecho que se introduzcan nuevos materiales, como el plástico, con propiedades totalmente diferentes.

El presente trabajo realiza un pequeño análisis de señal para determinar la calidad de dulzainas y flabioles de diferentes materiales a partir de muestras sonoras correspondientes a notas de la escala musical de cada instrumento [1].

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Dulzaina

La dulzaina es un instrumento aerófono formado por un tubo cónico de madera a cuyo extremo superior se fija una lengüeta doble por medio de una pieza metálica que suele denominarse tudel o tundel [2].



Figure 1. Dulzaina. Madera de Granadillo.

Es la variedad menos evolucionada del antiguo arquetipo del que se fueron derivando la chirimía, un poco más perfeccionada y variada en tamaños y tesituras, y el oboe, único de los instrumentos de lengüeta doble cuyo sonido logró entrar en la “gran música” debido al refinamiento de su timbre y a sus avanzados mecanismos técnicos de control de alturas.

El tubo cónico de la dulzaina se divide en tres zonas: cubilete, cuerpo y campana. El cubilete es la parte donde se coloca el tudel con la caña. El cuerpo es la parte central del instrumento, donde están realizados una serie de orificios en la parte delantera y trasera. La campana es la parte final, y actúa como bocina, amplificando de manera natural el sonido. En muchas ocasiones incorporan aros o abrazaderas colocados en la zona superior e inferior para sujetar el tubo.

La dulzaina, que en la mayor parte de las tierras de la Península Ibérica se ha usado en las músicas populares desde hace siglos, es la variedad más ruda y áspera de la familia de instrumentos de lengüeta doble, pero también la más potente. Dada su simplicidad y la relativa facilidad con que un artesano habilidoso la puede fabricar, viene siendo usada en el ámbito popular desde tiempos antiguos.

### Flabiol

El flabiol es un instrumento musical de viento (aerófono) de bisell, de la familia de las flautas de pico [3]. Su sonido se produce soplando por un conducto que dirige el aire hacia el bisell. Destaca por su corta medida y por la disposición de sus agujeros, que facilitan su uso con una sola mano, quedando la otra libre. Podemos distinguir entre el fabiol seco, desprovisto de llaves y que, pese a ser el más desconocido, es el más tradicional; y el flabiol de claves o flabiol de cobla.



Figure 2. Flabiol. Madera de Boj.

Su zona geográfica tradicional se extendería desde el sur de Cataluña hasta el Rosellón, y desde la Franja Oriental de Aragón hasta las islas Baleares, donde se utiliza también como instrumento solista con melodías propias.

**Materiales de Construcción**

La dulzaina se ha construido tradicionalmente de boj, encina y olivo. En la actualidad se emplean maderas como el palosanto o el granadillo, más densas y de mejor efecto sonoro.



Figure 3. Maderas empleadas en la construcción de dulzainas y flabioles [1].

Por lo que respecta al flabiol, normalmente se fabrican de tres tipos de madera: arce, boj y palosanto. Igual que la dulzaina, actualmente se pueden encontrar de maderas como el cerezo, el olivo o el ginjoler.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de algunas maderas empleadas en la construcción de instrumentos [4].

| Madera | Densidad ($kg/m^3$) | Módulo de Ruptura (MPa) | Módulo de Elasticidad (GPa) |
|---|---|---|---|
| Boj | 975 | 144,5 | 17,2 |
| Palosanto (Brasil) | 835 | 135 | 13,93 |
| Arce (rojo) | 610 | 92,4 | 11,31 |
| Arce (duro) | 705 | 109,0 | 12,62 |
| Ebano | 955 | 158,1 | 16,89 |
| Granadillo | 950 | 148,6 | 19,56 |

Podemos encontrar también instrumentos fabricados en plástico, cuyas propiedades mecánicas podrán ser fijadas a priori por el fabricante del instrumento.

La siguiente tabla recoge los instrumentos ensayados y el material de construcción empleado en cada caso:

Tabla 2. Maderas de los instrumentos analizados.

| **Dulzaina** | **Flabiol** |
|---|---|
| Boj | Arce |
| Ebano | Boj |
| Ginjoler | Caña Tipo 1 |
| Granadillo | Caña Tipo 2 |
| Palosanto | Palosanto |
| | Plástico |

**Adquisición de Muestras Sonoras**

El presente estudio se ha realizado a partir del análisis de muestras sonoras, correspondientes a escalas musicales, grabadas en un ambiente anecoico por medio de micrófonos de medida B&K Tipo 4188.

Tabla 3. Escalas musicales registradas.

| Escala Dolzaina | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LA4 | SI4 | DO#5 | RE5 | MI5 | FA#5 | SOL5 | LA5 | SI5 | DO#6 | RE6 |

| Escala Flabiol | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RE5 | MI5 | FA#5 | SOL5 | LA5 | SI5 | DO6 | RE6 | MI6 | FA#6 | SOL6 |

Todos los instrumentos han sido interpretados por el mismo músico bajo las mismas condiciones.

**Parámetros de Análisis**

Para estudiar el comportamiento de los instrumentos en función de los distintos materiales se ha realizado un análisis de señal basado en los siguientes parámetros:

- Nivel normalizado: comparación del nivel emitido por cada instrumento, estudio de la influencia del material de construcción.
- Desviación de frecuencias respecto a la teórica: permitirá visualizar el grado de afinación del instrumento en función del material utilizado.
- Relación de Potencias: relación entre la potencia de la frecuencia fundamental y la potencia de los armónicos. Este parámetro proporciona una indicación del volumen de armónicos generados por el instrumento, lo cual estará íntimamente relacionado con el timbre. Nos permitirá estudiar el comportamiento de los armónicos en función del material empleado en la construcción del instrumento.

$$Relación\ de\ Potencias = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \cdots}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \cdots}} \qquad (1)$$

- Factor de Calidad, Q: relación entre la frecuencia de estudio y el ancho de banda ±3dB alrededor de la misma. Permitirá establecer la pureza de cada uno de los tonos armónicos generados por el instrumento.
- Sonoridad: medida subjetiva de la intensidad sonora percibida por el oído humano.

$$N = (10^{\frac{L_N - 40}{10}})^{0.30103} \approx 2^{\frac{L_N - 40}{10}} \qquad (2)$$

- Agudeza: proporciona una medida del contenido de alta frecuencia que posee un sonido. Aplicado al instrumento nos dará una idea de la riqueza espectral de la nota.

$$S = c\frac{\int_0^{24\ Bark} N' g'(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24\ Bark} N' dz} \qquad (3)$$

La sonoridad y la agudeza son parámetros cuya finalidad es objetivar la percepción subjetiva del oyente. La correlación entre parámetros objetivos y subjetivos puede determinarse por medio de ensayos psicoacústicos.

Además de los parámetros indicados anteriormente, se ha llevado a cabo un análisis espectral de cada una de las notas registradas.

**RESULTADOS**

**Análisis Espectral**

Si analizamos espectralmente la dulzaina y el flabiol, vemos que ambos difieren de forma clara en el número de armónicos, lo que les confiere un timbre distinto. El primero, la dulzaina, tiene un contenido espectral a alta frecuencia mucho más rico en armónicos.

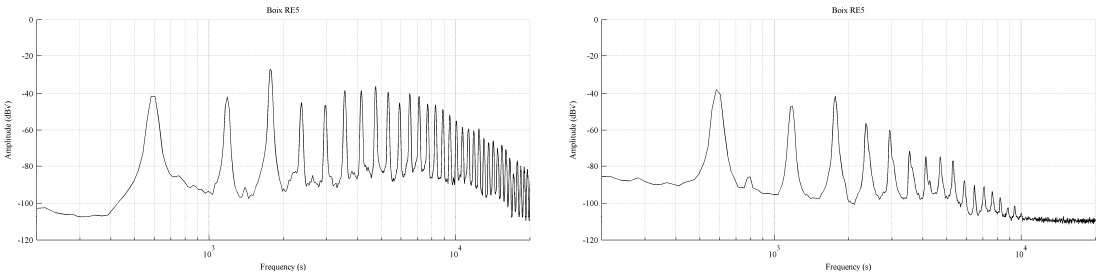


Figure 4. Espectros de frecuencias nota RE5. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

Si analizamos una nota de frecuencia superior, vemos como el contenido espectral se ve reducido, especialmente en el flabiol, donde los armónicos de orden superior dejan de ser excitados de una manera clara.

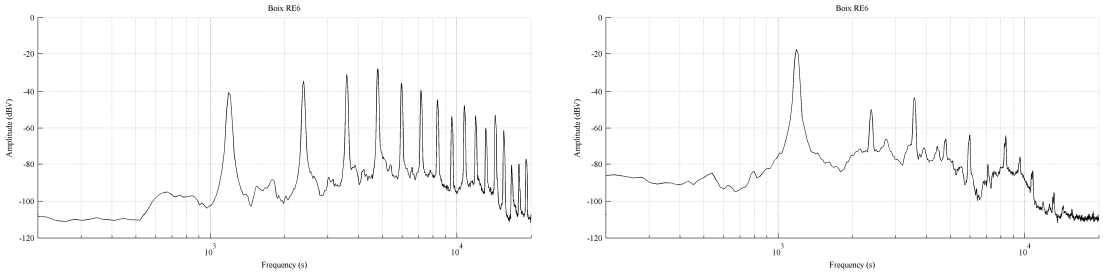


Figure 5. Espectros de frecuencia nota RE6. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

El nivel de los armónicos para alguno de los materiales es inferior, especialmente en las cañas.

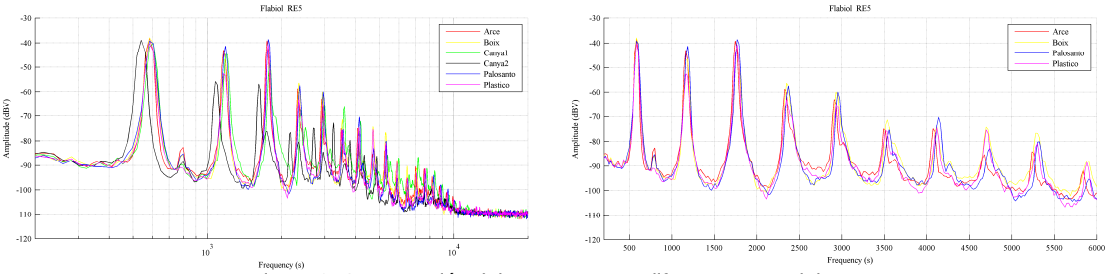


Figure 6. Comparación del espectro para diferentes materiales.

Si visualizamos las componentes de alta frecuencia, vemos como el instrumento fabricado con plástico excita con menor nivel los armónicos de orden superior, lo cual le confiere un timbre ligeramente distinto.

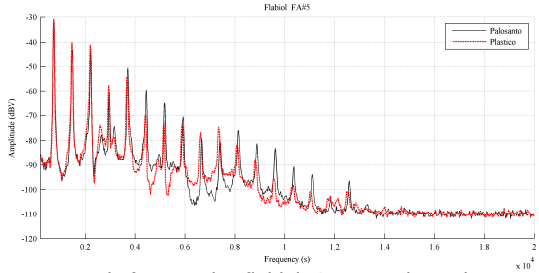


Figure 7. Espectro de frecuencias flabiol. Comparativa palosanto y plástico.

**Nivel normalizado**

La dolzaina presenta un nivel de presión sonora relativamente plano para toda la escala musical (±2 dB), a excepción de la nota SOL5. Atendiendo al material de fabricación, observamos un nivel ligeramente superior para en el palosanto e inferior para el granadillo. La diferencia está comprendida entre 2 y 4 dB en función de la nota interpretada.

Para el flabiol, el nivel se incrementa a medida que subimos de tono en la escala musical, con una diferencia máxima de aproximadamente 30 dB. En este caso, se observa un nivel mayor para el arce y el boj, siendo claramente inferior en el caso de la caña tipo 2.

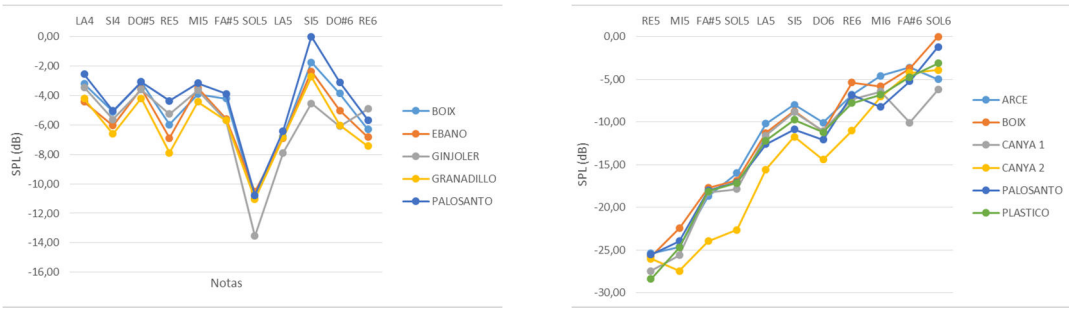



Figure 8. Nivel de presión normalizado. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

**Desviación de frecuencias respecto a las teóricas calculadas**

Centrándonos en la desviación de frecuencia media de todas las notas respecto a la frecuencia teórica esperada, observamos como en la dulzaina, el boj y el palosanto se comportan de manera más cercana al ideal. Para los instrumentos de materiales distintos se produce una desviación de la frecuencia de la nota de aproximadamente el 1 %.

Si analizamos el flabiol, vemos un resultado similar al obtenido para la dulzaina. Las maderas de boj y palosanto muestran un comportamiento más próximo al teórico esperado. Cabe destacar la gran desviación que supone el uso de cañas en la fabricación del flabiol, con desviaciones respecto a la frecuencia teórica de la nota de entre un 4% y un 6%.

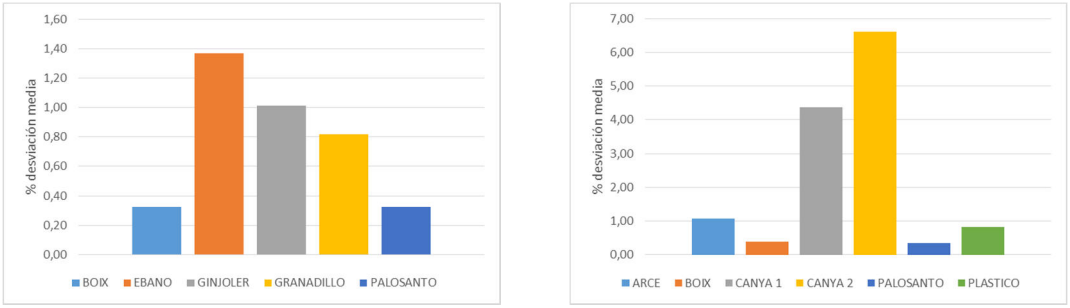



Figure 9. Desviación de frecuencia media. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

Si analizamos el espectro de una de las notas interpretadas en el flabiol se aprecia claramente esta desviación de frecuencia.

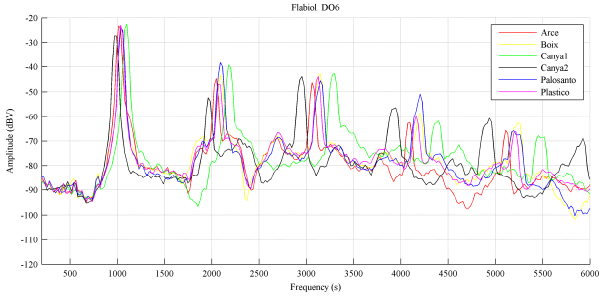



Figure 10. Espectro de frecuencias flabiol.

**Relación de potencias**

Analizando la relación de potencias para la dulzaina, obtenemos un valor ligeramente inferior para el palosanto. Este resultado se traduce en un peso mayor de la frecuencia fundamental de la nota en su composición tonal. Por el contrario, el ginjoler generará una distribución de armónicos con un peso ligeramente mayor al del resto de materiales.

Por lo que respecta al flabiol, la relación de potencias disminuye al aumentar la frecuencia de la nota interpretada. Este fenómeno concuerda con lo visto en el espectro de frecuencia, donde se produce una pérdida de armónicos al incrementar la nota. Comparando los materiales, el palosanto proporciona un valor ligeramente superior, contrario a lo que sucedía en la dulzaina. En este caso la aportación de los armónicos al nivel global tendrá mayor peso.

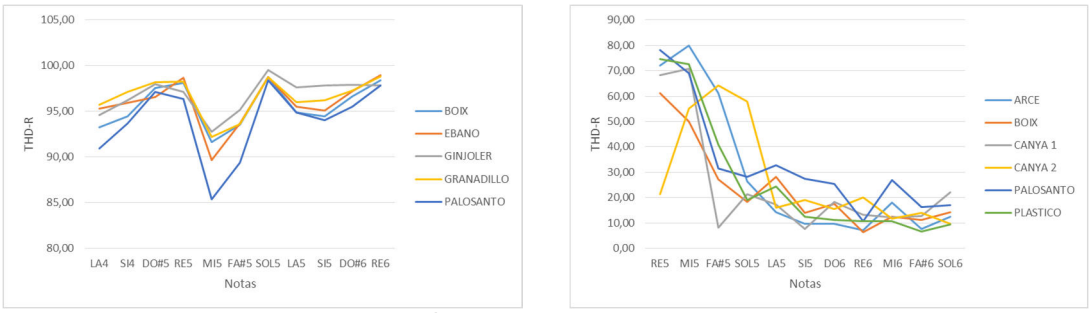



Figure 11. Relación de potencias. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

## Factor de calidad, Q

Observando el factor de calidad para cada una de los materiales utilizados en la dulzaina observamos como el ébano tiene un valor ligeramente superior, lo que se traduce en un factor de pérdidas inferior y en una mayor pureza de los tonos emitidos por el instrumento. Contrariamente, el ginjoler presentará campanas de mayor ancho de banda en las frecuencias de interés.

El análisis del factor de calidad del flabiol da como resultado valores superiores a los de la dulzaina y por tanto estará dotado de una pureza tonal mayor. Comparando materiales, la caña tipo 1 proporciona tonos más puros, mientras que la caña tipo 2 ofrece una campana con mayor ancho de banda, lo que dará lugar a un factor de pérdidas superior.

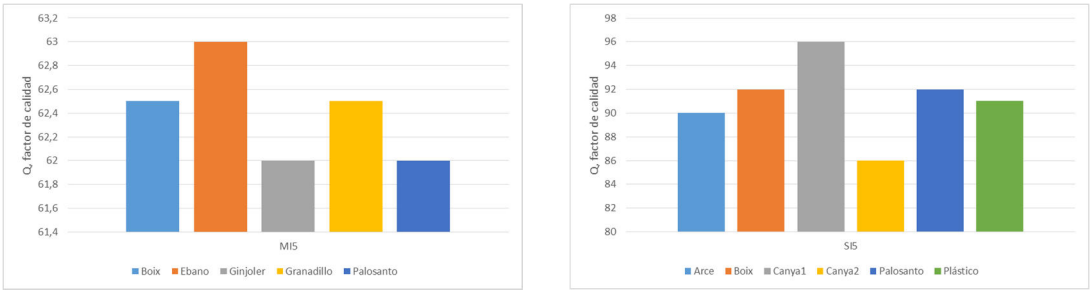



Figure 12. Factor de calidad medio. (izq) dulzain. (dch) flabiol.

El factor de calidad, igual que sucede con el resto de parámetros, se ve influenciado fuertemente por la frecuencia fundamental de la nota, incrementando su valor conforme avanzamos en la escala. Las diferencias existentes entre los materiales de construcción persisten con el cambio de frecuencia. La siguiente gráfica muestra la evolución del factor de calidad de las frecuencias fundamentales de la escala musical.

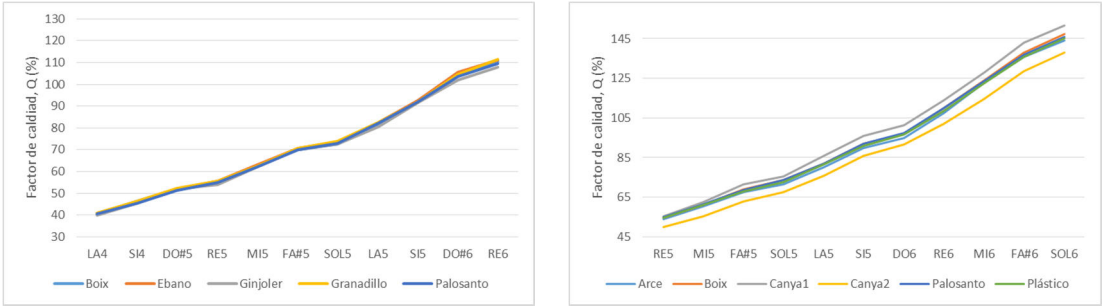



Figure 13. Evolución del facto de calidad con la frecuencia de la nota. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

**Sonoridad y agudeza**

Si analizamos la sonoridad de los instrumentos, existe gran variabilidad del parámetro en función de la nota interpretada. Normalizando los valores de sonoridad de cada una de las notas respecto al máximo de entre todos los instrumentos, observamos que el palosanto, tanto en el flabiol como en la dulzaina, será percibido con una intensidad mayor. El uso de cañas como material para la construcción del flabiol da como resultado una variación mayor de la sonoridad.

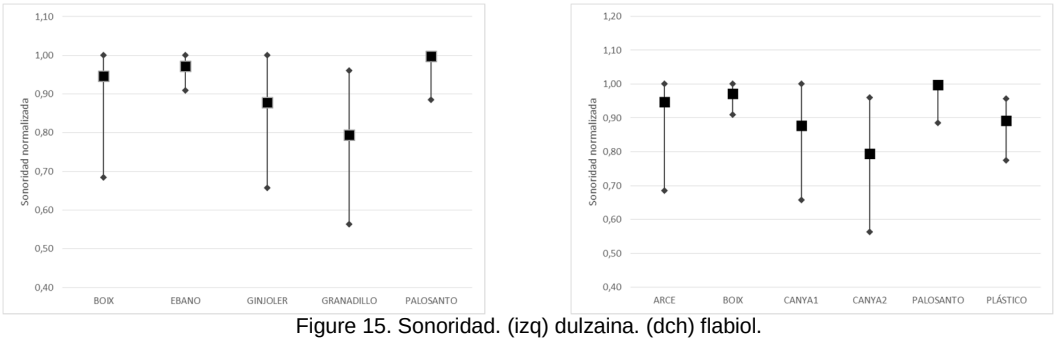



Figure 15. Sonoridad. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

Atendiendo a la agudeza normalizada, el material con mayor valor corresponde al ginjoler, mientras que el granadillo producirá la mayor variación entre notas. En cuanto al fabiol, la canya de tipo 1 presenta un mayor contenido de alta frecuencia, mientras que la caña 2 presenta una mayor variabilidad. En ambos casos el palosanto se encuentra entre los que mayor contenido de alta frecuencia poseen.

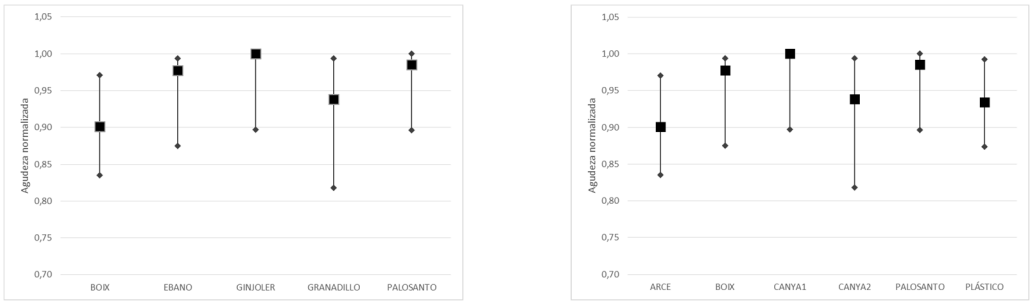



Figure 15. Agudeza. (izq) dulzaina. (dch) flabiol.

**CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados obtenidos, la dulzaina construida con palosanto tiene una composición espectral rica en armónicos, con un nivel de presión sonora superior al resto de materiales. La desviación respecto a la frecuencia teórica es menor, comportándose de manera más próxima al caso ideal. Del mismo modo, presenta una relación de potencias y un factor de calidad bajo, lo que aportará más cuerpo al sonido dado el ensanchamiento de la campana formada por las frecuencias excitadas.

En referencia al flabiol, la madera de arce presenta un nivel de presión sonora superior, con una desviación en frecuencia inferior al resto de materiales y una relación de potencias baja. En este caso, el arce da como resultado un factor de calidad alto y por tanto un sonido tonal más puro.

**REFERENCIAS**

[1] Instrumentos Bessó. www.pacobesso.net. 01 de septiembre de 2015.
[2] Miguel Manzano, ”Dulzaina, gaita y flauta, tres instrumentos populares”. Breve estudio introductorio a una colección de “Músicas nuevas para instrumentos viejos”. 2009.
[3] “El flabiol I el tamborí”. Direcció General de Cultura Popular, Associacionisme i Acció Culturals. Generalitat de Catalunya.
[4] Eric Meier, “The wood database”. www.wood-database.com. 09 de septiembre de 2015.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# OS EFEITOS ACÚSTICOS DOS AEROFONES MADEIRAS NA ORQUESTRA SINFÔNICA

PACS: 43.75.Ef

Maria Lúcia Grillo[1]; Luiz Roberto Baptista[1] e Luiz Puginelli Brandão[2]
[1]Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rua São Francisco Xavier 524, sala 3034D, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 20.550-013, Tel: 55-21-23340844, e-mail: mluciag@uerj.br e maestroluizroberto@ig.com.br
[2]Colégio Estadual João Alfredo
Boulevard 28 de Setembro, 109 fundos, Vila Isabel, Rio de Janeiro, RJ, CEP 20551-030, Tel: 55-21-2234-2105, e-mail: luizbrand@gmail.com

## ABSTRACT

Observing the current symphony orchestra, we see that it remains romantic, with little evolution from Romanticism to the present day. It consists of string instruments, aerophones (woodwinds and brasses), idiophones and membranophones. The strings are the soul of the orchestra and its reason to exist. The aerophones are divided into woods and metals; metals have the same process of emission of sound and the same attach. The percussion has a multitude of instruments, with determined sound or not. In this work we study the acoustic effects of the woods in the orchestra, which can be of three kinds: free mouthpiece, single reed and double reed.

## RESUMO

Observando a orquestra sinfônica atual, constatamos que ela permanece romântica, havendo pouca evolução desde o Romantismo até os nossos dias nesta formação musical. Ela é composta por: cordofones, aerofones (madeiras e metais), idiofones e membranofones. As cordas são a alma da orquestra e sua razão de existir. Os aerofones dividem-se em madeiras e metais; os metais têm um processo de emissão sonora e ataque iguais. A percussão tem uma infinidade de instrumentos de som determinado ou não. Neste trabalho estudamos os efeitos acústicos das madeiras na orquestra, que podem ser de três espécies: embocadura livre, palheta simples e palheta dupla.

## INTRODUÇÃO

O termo aerofones é a designação da família de instrumentos de sopro, cuja coluna de ar é posta em vibração através do fluxo de ar de encontro a uma borda ou mediante uma palheta. Podem ser feitos de madeira, ebonite, metal (inclusive latão, no caso do saxofone), marfim ou outros materiais. Obtêm-se as notas tapando-se ou destapando-se os orifícios com os dedos, a fim de variar o comprimento de vibração da coluna de ar, diferente dos pistos dos metais. Os instrumentos de sopro podem ser oitavados, forçados a vibrar em seções, produzindo uma

nota mais aguda, normalmente uma 8ª ou uma 8ª e uma 5ª, dependendo das propriedades físicas do tubo. (Sadie,1994:561) Ao contrário dos cordofones, cujo corpo vibrante é sólido (cordas que vibram transversalmente) os aerofones possuem o corpo vibrante gasoso (ar) e a vibração é longitudinal ao longo do tubo. (RIBEIRO, 2005:109) Seus tubos são do tipo aberto-fechado. Segundo Rossing (1990) a reflexão do ar ocorre com inversão de fase na extremidade aberta e sem inversão na extremidade fechada (bocal ou palheta). O ar introduzido é refletido e volta invertido, empurrando a palheta, e é novamente refletido invertido. Ao atingir novamente a extremidade aberta é novamente refletido e volta à posição inicial, puxando a palheta ou bocal, ao ser refletido novamente. (ROSSING, 1990:239) Segundo Fletcher (2008) as alturas das notas podem ser diminuídas aumentando um pouco o tubo, em uma ou mais de suas juntas, porém não deve exceder um quarto de semitom, pois prejudicaria a afinação na escala igualmente temperada. A afinação das madeiras aumenta com o aumento da temperatura, devido ao aumento da velocidade do som. Os cordofones diminuem a afinação com a temperatura, isso exige então uma atenção particular quanto à afinação nas orquestras. (FLETCHER e ROSSING, 2008:469-70)

## DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Os principais instrumentos em que o executante dirige o fluxo de ar de encontro a uma borda são os do tipo da flauta, tanto as sopradas pela extremidade (flauta doce) quanto lateralmente (flauta transversal).

Entre os instrumentos de palheta dupla (duas lâminas ou linguetas de cana, madeira, metal, etc, que vibram uma contra a outra) incluem-se o Oboé, o Corne inglês, o Fagote e o Contra fagote. Um dos mais antigos instrumentos de palheta dupla é o Krumhorn, em que a palheta não entra em contato com os lábios do executante; enquadra-se na categoria conhecida como “instrumentos de palheta encapsulada”.

Entre os instrumentos de uma única palheta que vibra contra o bocal, ou boquilha, encontram-se o Clarinete, a Requinta, o Clarone e a família dos Saxofones.

Esses três tipos de instrumentos formam o grupo (ou naipe) chamado aerofones madeira, embora nem todos sejam feitos de madeira, mas possuem algumas características comuns.

As principais madeiras usadas na Orquestra Moderna são: a Flauta transversal em Dó, Flauta em Sol, Flautim em Dó, o Oboé em Dó, o Corne inglês em Fá, Fagote em Dó (digitação francesa ou alemã) e Contra fagote (8ª abaixo do fagote), o Clarinete em Sib e Lá, a Requinta em Mib, o Clarone em Sib e Mib. Também faz parte ocasionalmente, em algumas peças, a família dos saxofones: Saxofone Soprano em Sib, Alto em Mib, Tenor em Sib, Barítono em Mib e o Baixo em Sib (pouco usado).

## OS AEROFONES MADEIRAS NA ORQUESTRA SINFÔNICA

A palavra orquestra (do grego orkhêstra e do latim orchestra) designava nos teatros da Grécia antiga, o local onde se reuniam os coros para as danças e evoluções em volta do Tímele (altar de Dionísio). Nos teatros romanos, designava o lugar reservado aos senadores e magistrados. Em nossos dias designa, universalmente, um conjunto instrumental organizado com uma certa proporcionalidade entre as diversas sonoridades e timbres de que se compõem e as exigências das diversas técnicas de composição. (SADIE, 1994:685)

Ao longo do tempo uma determinada formação orquestral foi se estabelecendo por vários motivos. O mais importante deles foi a projeção sonora, pois tocar nas salas de concerto com instrumentos de timbre agradável, porém com intensidade sonora fraca, levou os compositores

a preferirem aqueles instrumentos apropriados para salas repletas de gente querendo ouvir boa música.

Conforme Lima (1948), o Orfeu de Monteverdi (1607) foi executado com: 2 cravos, 2 contrabaixos de viola, 1 harpa dupla, 2 órgãos de madeira, 3 violas de gamba, 2 violinos à francesa, 10 violas de braço,1 flauta (espécie de flageolé), 2 cornetas de madeira, 1 trombeta aguda, 3 trombetas com surdina, 4 trombones e 1 regale (espécie de realejo). Com essa orquestra, enorme para a época, estava lançada a pedra fundamental do grande edifício da música orquestral. Depois disso começam a aparecer os conjuntos instrumentais mais numerosos e a música orquestral eleva-se a alturas nunca sonhadas, delineando-se claramente os rumos à moderna orquestração. Constituem-se por toda parte orquestras de festa e orquestras de baile. Difunde-se o gosto pelos instrumentos da família das violas. (LIMA, 1948:164).

A orquestra bachiana, a despeito do emprego ocasional do trombone, era constituída dos seguintes instrumentos: 2 flautas, 2 ou 3 oboés, 1 a 2 fagotes, 3 trompetes, 3 primeiros violinos, 3 segundos violinos, 4 violas, 2 violoncelos e 1 contrabaixo.

Conforme Károlyi (2002), Haydn, Mozart e Beethoven foram os marcos mais eminentes da orquestra clássica. Era a seguinte a sua constituição: 2 flautas, 2 oboés, 2 clarinetes, 2 fagotes, 2 trompetes, 2 trompas, 1 par de tímpanos, 10 primeiros violinos, 8 segundos violinos, 6 violas, 6 violoncelos e 4 contrabaixos. Podia variar em número de violinos ou na introdução de um ou outro instrumento. O conceito de orquestra clássica admite, assim, certa relatividade. Em Beethoven, só na 9ª Sinfonia, a orquestra não pode ser considerada clássica. O período em que os compositores utilizaram-se da orquestra do tipo clássico foi de 60 anos, aproximadamente, alcançando o início do séc. XIX. Mas vale a pena ressaltar a curiosa formação orquestral da Ópera de Paris (1775): 3 flautas, 3 oboés, 2 clarinetes, 8 fagotes, 1 trompete, 2 trompas, 1 par de tímpanos, 1 tambor, 3 violas, 22 violinos ($1^{os}$ e $2^{os}$), 4 violoncelos e 6 contrabaixos. (Károlyi, 2002:177)

Mozart resolveu viver por conta própria, sem patrocínio do clero ou da nobreza, usando o seu talento extraordinário para receber encomendas de peças musicais e também aumentar o público nas récitas para que através do ingresso viesse o pagamento do trabalho. Ele (um gênio inigualável em sua época e ainda permanece genial hoje) talvez tenha sido realmente o primeiro músico na História da Música a buscar essa autonomia. Infelizmente sem sucesso, pois morreu na miséria. Beethoven teve mais sucesso um pouco depois e até deixou um testamento com bens para seu sobrinho.

No século XIX, com o advento do Romantismo, a orquestra toma novo impulso. As escolas de virtuosidade do violino e do piano, que se estabelecem por toda a parte, difundem o gosto pela técnica instrumental e esse virtuosismo influencia diretamente a criação orquestral. Primeiro Paganini, depois Liszt, criam efeitos especiais, prodígios de técnica, nos seus instrumentos, a que a orquestra não pode ser insensível. A orquestra, já enriquecida com o advento dos instrumentos de válvulas e pistões, de que o fabricante Adolfo Sax a dotara, transforma-se repentinamente com Berlioz. Na França, a orquestra de Paris passa por reforma e tem a seguinte organização: 3 flautas, 2 oboés, 1 corne inglês, 2 clarinetes, 1 clarinete baixo, 4 fagotes, 4 trompas, 3 trompetes, 2 cornetins, 3 trombones, 1 tuba, 1 par de tímpanos, 1 tambor, 1 triângulo, 1 bombo, 1 par de pratos, 4 harpas, 40 violinos ($1^{os}$ e $2^{os}$), 10 violas, 12 violoncelos e 10 contrabaixos. Além desses instrumentos há ainda os saxofones, os saxhornes e os sarrussofones, os quais figuram, às vezes, excepcionalmente. (LIMA, 1948:165)

A supremacia da parte musical sobre a literária no drama wagneriano leva o autor da Tetralogia a aumentar de muito a sonoridade da orquestra, o que faz por meio de uma orquestração verdadeiramente suntuosa, em que os instrumentos de sopro desempenham papel de extraordinária relevância, e ainda pela elevada quantidade deles. Neste ponto se dá a transição da orquestra romântica para a moderna de Wagner.

A orquestra sinfônica contemporânea abraça quase todos os instrumentos de sopro atuais. Assinala-se o emprego em alta escala, dos instrumentos de percussão de tipos os mais diversos e uma tendência bem acentuada de incorporação do piano entre os instrumentos obrigatórios. Algumas vezes até a voz humana tem sido usada como instrumento da orquestra. Outras vezes retiram-se os violinos, como fez Strawinski na Sinfonia dos Salmos, ou se lhe junta toda uma banda de música do tipo militar, como fez Villa Lobos na Sinfonia Guerra.

O pensamento criador nos domínios da composição musical, imediatamente influenciado pelas revolucionárias correntes modernistas (Impressionismo e Expressionismo) necessariamente expandiu-se no colorido orquestral. No Atonalismo e no Politonalismo acontecem inusitados processos de orquestração. Sonoridades e timbres diversos entrosam-se em exuberante polirritmia, fundem-se em agregações sônicas e, quais fórmulas físicas, circulam na composição dos mais variados matizes pitorescos da expressão musical por meio da orquestra.

## FASES HISTÓRICAS DA ORQUESTRA

Conforme Lima (1948), as fases históricas da orquestra são: 1) Antiga: Monteverdi, Cavalli, Carissimi, Lulli, etc; 2) Pré-Clássica: Scarlatti, Rameau, J.S.Bach, Haendel, etc; 3) Clássica: C. F. E. Bach, Haydn, Mozart, Beethoven, etc; 4) Romântica: Ópera de Paris (1775), Weber, Merverbeer, Mendelsshon, Schumann, etc; 5) Moderna: Berlioz, Wagner, Strauss, G. Mahler, etc; 6) Contemporânea: Schoenberg, Strawinski, Vila-Lobos, Shostakovich, Prokofiev, etc.

## DISPOSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DA ORQUESTRA

A disposição dos instrumentos da orquestra condiciona-se a vários fatores, não só de caráter estético, mas acústico e técnico, relacionados com a natureza, sonoridade e timbre dos instrumentos e a importância do seu papel no conjunto. Alguns regentes vêm adotando há algum tempo (provavelmente após 1830) uma disposição em que os $1^{os}$ e $2^{os}$ violinos ficam à esquerda e as violas e violoncelos à direita do regente. As madeiras, sempre que possível, ficam em frente ao regente por trás das cordas. Mas isso varia muito de regente para regente. A justificativa é sempre acústica.

## O PAPEL PRIMORDIAL DAS MADEIRAS NA ORQUESTRA SINFÔNICA

Debussy, célebre compositor francês, inicia a sua famosa “L’après midi d’um faune” (1894) com um solo de flauta transversa sem acompanhamento e anuncia uma nova maneira de orquestrar que o diferencia completamente de Wagner. Isso é só um exemplo brilhante de atribuição de importância a um naipe que tem função diferenciada na orquestra. No Concerto de Aranjuez, de J. Rodrigo, o solo de corne inglês, do famoso Adágio, dá um toque misterioso que anuncia com precisão o solo de violão, talvez o mais famoso da história do instrumento. Esses duos, trios, quartetos, quintetos, funcionando como naipe dentro da orquestra, traz um som que os diferencia das cordas e dos metais. Os de palheta dupla: oboé, corne inglês, fagote e contra fagote, têm um timbre anasalado que lembra antigos instrumentos. Prestam-se tanto para músicas bucólicas como para passagens mais céleres. Os de palheta simples: requinta, clarinete, cor de basset (Fá), clarone Mi bemol e Si bemol (baixo) são instrumentos usados em passagens de extrema agilidade. A palheta simples apertada junto à boquilha traz um timbre característico ao instrumento que o diferencia de todos os outros instrumentos de sopro.

Os chamados de embocadura livre, onde o sopro é de maneira tangencial ao orifício do bocal, são as flautas: flautim, flauta em dó (soprano), flauta (alto) em sol ($4^{a}$ abaixo), flauta baixo ($8^{a}$ abaixo da soprano) que na realidade, levando-se em conta a voz humana, deveria chamar-se tenor.

Na partitura do regente as madeiras ocupam a 1ª posição onde a ordem de visualização de cima para baixo é: Madeiras, Metais, Percussões e Cordas. As madeiras ficam localizadas sempre em frente ao regente, às vezes se usa um praticável para destacar sua importância que normalmente é fundamental e coloca os músicos num plano mais elevado acima das cordas para que sua sonoridade distinta se projete e se destaque da massa sonora das cordas.

As combinações tímbricas são muito interessantes nas madeiras e podemos citar algumas mais usadas: flauta e flautim dobrando a melodia que se oitava naturalmente; flauta e fagote que mostram um som anasalado da palheta dupla combinado com o timbre do bocal soprado diretamente para um orifício no bocal. O clarinete tocado em duo com o fagote provoca uma sensação diversa da anterior, pois um tem uma boquilha com uma palheta simples que se presta a qualquer tipo de passagem musical rápida ou lenta e geralmente usada sem vibrato. Já o fagote (que também realiza muito bem as passagens rápidas), sobretudo nas passagens lentas, aproveita-se muito bem da riqueza do vibrato transmitindo a percepção de um instrumento "plano" sem vibrato (clarinete) e o outro cheio de variações sonoras com o vibrato (fagote). Há também outras combinações menos usadas, mas igualmente interessantes, como contrafagote e fagote, corne inglês e clarinete, flautim e fagote. Os especialistas em orquestração como Rimsky-Korsakov (1844-1908) e Maurice Ravel (1875-1937) souberam tirar novos timbres das combinações dos aerofones madeiras. Ravel mostrou seu talento genial para a orquestração na obra para piano solo "Quadros de uma Exposição" de M. Mussorgsky e também no "Bolero" (que nada mais é do que um grande estudo de timbres com novas combinações), que incluem o saxofone (usado com vibrato) nas madeiras. As madeiras são uma maneira diferente de pensar a música, pois o que é tocado nas cordas pode ser repetido nas madeiras ou nos metais e tem impacto acústico e emocional completamente distinto.

## ESPECTROSCOPIA SONORA DOS AEROFONES MADEIRAS: resultados e conclusões

Foram obtidos os espectros sonoros dos cinco aerofones normalmente utilizados em orquestras sinfônicas, que evidenciam a variedade de timbres. Os instrumentos foram os seguintes: flautim Armstrong, flauta transversa Armstrong, fagote Conductor, oboé Conductor, clarinete Yamaha. Os níveis de pressão sonora de algumas notas foram obtidos a uma distância de 1 m, na direção frontal do instrumento, com execução forte. Os valores médios do Leq, medidos com um sonômetro marca Instrutemp, modelo ITDEC 4020, estão apresentados na tabela 1 e evidenciam, conforme Grillo (2012 e 2013), que os aerofones madeira são muito intensos, principalmente em frequências mais altas, mais que os cordofones, porém não tanto quanto os aerofones metais. A flauta doce já fez parte da orquestra sinfônica, porém devido ao seu baixo nível de pressão sonora, foi retirada, com o aumento do número de outros instrumentos. As notas agudas e super agudas, dentro de cada extensão do instrumento, necessitam gradativamente de maior pressão no ataque. Usamos notas médias para cada instrumento.

| Intrumento | Nota | NPS - Leq - dB(A) |
|---|---|---|
| Flautim | $Sol_5$ | 83 |
| Flauta transversa | $Sol_4$ | 75,3 |
| Fagote | $Dó_2$ | 82,8 |
| Oboé | $Sol_4$ | 83,5 |
| Clarinete | $Si_{b2}$ | 80,0 |

O mais agudo dentre eles é o flautim. A figura 1 apresenta 2 espectros do flautim, emitindo o $dó_5$ e o $sol_5$ (frequências 1.046 Hz e 1568 Hz respectivamente). Conforme pode ser observado, as linhas da frequência fundamental e harmônicos são ladeadas por ruídos, referentes ao sopro com alta pressão, que normalmente está presente durante a execução desse instrumento, e é necessário para a emissão equilibrada das notas. Seu som é intenso, devido principalmente ao primeiro harmônico, e apresenta um deslocamento para frequências maiores, principalmente em harmônicos mais agudos.

Na figura 2a vemos o espectro da nota $sol_4$ emitida por uma flauta transversa em dó e na figura 2b dois espectros superpostos ($sol_4$ em verde e $sol_5$ em preto). O espectro do $sol_4$ da flauta transversa (fig. 2a) apresenta a frequência fundamental e 5 harmônicos. Podemos ver que o $5^o$ harmônico está ausente e aparece o $6^o$ harmônico. Há a presença de ruídos não harmônicos e a frequência fundamental é a mais intensa, como no flautim. Podemos observar que a flauta é um instrumento harmônico, pois os 4 primeiros harmônicos mantém uma relação exata com a frequência fundamental de múltiplos inteiros. Na figura 2b podemos comparar os ruídos, as intensidades relativas e as frequências presentes. Pode ser observado que a emissão de notas mais altas exige do músico mais pressão no bocal, o que gera um ligeiro deslocamento para frequências mais altas e um aumento nos ruídos.

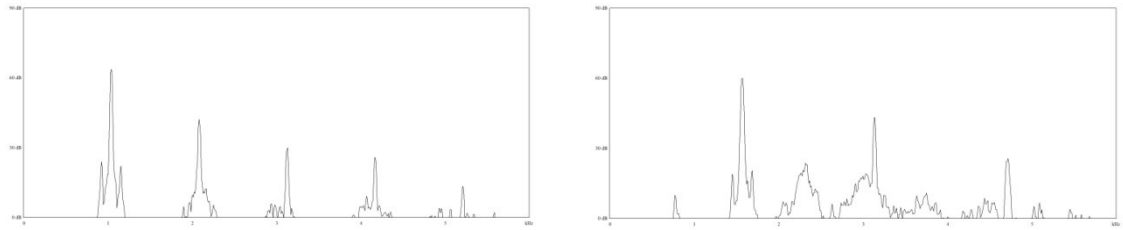


Fig. 1: espectros do flautim: a) $dó_5$ b) $sol_5$

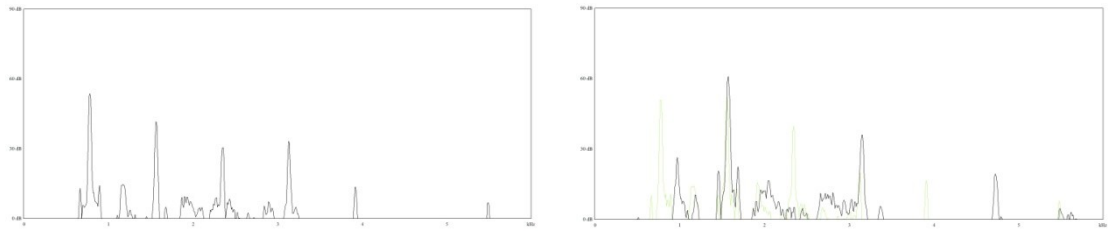


Fig. 2: espectros da flauta: a) $sol_4$ b) $sol_4$ e $sol_5$

O fagote é um pouco menos harmônico que a flauta transversa e o flautim, apresentando um deslocamento para frequências maiores a partir do primeiro harmônico. Na figura 3 vemos 2 espectros do fagote, com as notas $sol_1$ (98 Hz) e $dó_3$ (261,6 Hz).

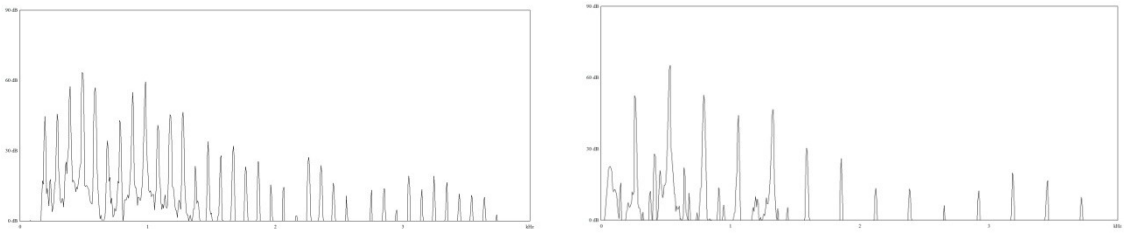
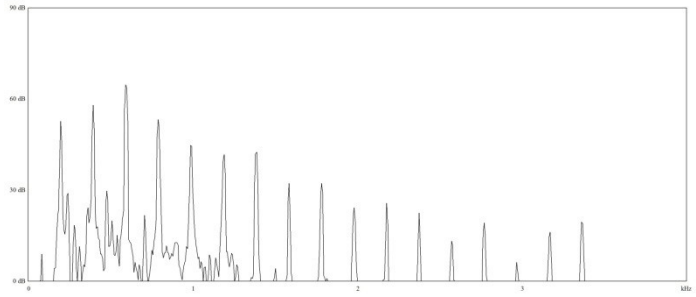


Fig. 3: espectros do fagote: a) $sol_1$ b) $dó_3$

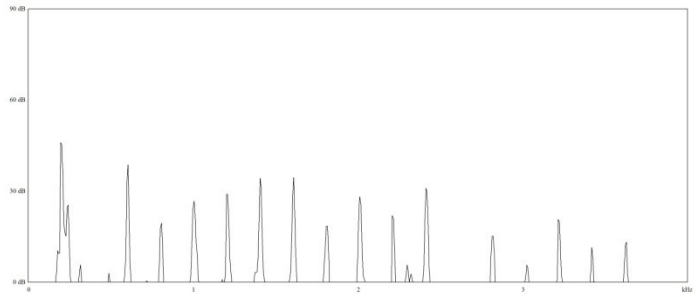
Na figura 3b podemos observar que estão presentes as frequências fundamental e vários harmônicos. A fundamental não é a mais intensa. O espectro do $sol_1$ não possui a frequência fundamental, apresentando o primeiro harmônico um pouco menos intenso que o segundo e são evidenciados os formantes, que geram uma espécie de envoltória no espectro, devido a maiores intensidades em algumas frequências. A fundamental também está ausente nas notas $dó_2$, $ré_2$, $mi_2$ e $fá_2$. Segundo Fletcher e Rossing (2008) a radiação fundamental é fraca nas notas mais baixas devido ao pequeno diâmetro do tubo e seu timbre é aveludado e não brilhante, devido à relativamente baixa frequência de corte, em torno de 300 a 600 Hz. (FLETCHER e ROSSING, 2008:495) Acima da frequência de corte o som é irradiado livremente e não reflete de forma que não produz ressonância. Os dois espectros das figuras 3a e 3b apresentam picos pequenos não harmônicos devidos aos ruídos gerados pelo sopro do músico na palheta dupla. A ausência da frequência fundamental acontece apenas em algumas notas no fagote. Temos a

sensação de ouvir a fundamental devido à superposição das frequências harmônicas. O mesmo acontece quando superpomos uma luz azul e uma amarela, gerando a percepção de uma luz verde, embora esta não esteja sendo emitida. Segundo Grothe e Kob (2013) a radiação do fagote varia de monopolo para multipolo. O aparecimento ou não da fundamental depende da direcionalidade e uma possível explicação pode ser a interferência destrutiva de dois componentes de igual densidade de radiação que aparecem em dipolos. Obtivemos espectros com variação da direção e confirmamos a dependência da direção da medida.

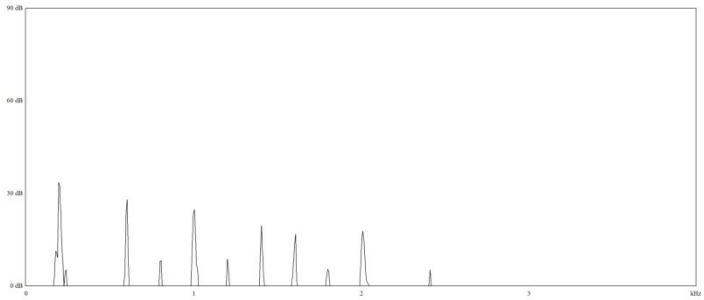
Na figura 4 vemos 3 espectros do $sol_2$ (196 Hz) do fagote, com emissão forte, piano e pianíssimo. Vemos que as frequências não diminuem de forma uniforme e na emissão pianíssimo aparecem de forma mais intensa os harmônicos ímpares, que estariam presentes mesmo que o tubo não fosse levemente cônico. Os harmônicos mais agudos são pouco intensos no espectro forte e não aparecem no espectro pianíssimo, o que evidencia uma mudança gradativa do timbre com a diminuição da pressão na palheta dupla.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4: espectros do $sol_2$ do fagote: a) forte, b) piano, c) pianíssimo

Os espectros do oboé estão apresentados na figura 5, com emissão das notas $dó_3$ (261,6 Hz) e $dó_4$ (523,2 Hz). A fundamental da nota $dó_3$ do oboé é um pouco mais intensa que o primeiro harmônico, porém aparecem outros harmônicos com frequências bem mais intensas. No $dó_4$ a fundamental é a menos intensa. Em ambos os espectros foi observado o mesmo deslocamento para frequências mais altas. Podemos comparar os espectros do oboé e do fagote com

emissão da nota dó$_3$. No fagote a fundamental é menos intensa que o primeiro harmônico, o que não acontece com o oboé. O deslocamento para frequências mais elevadas nos harmônicos está presente em ambos. O oboé possui os harmônicos mais agudos bem mais intensos que o fagote, o que resulta em um timbre mais brilhante.

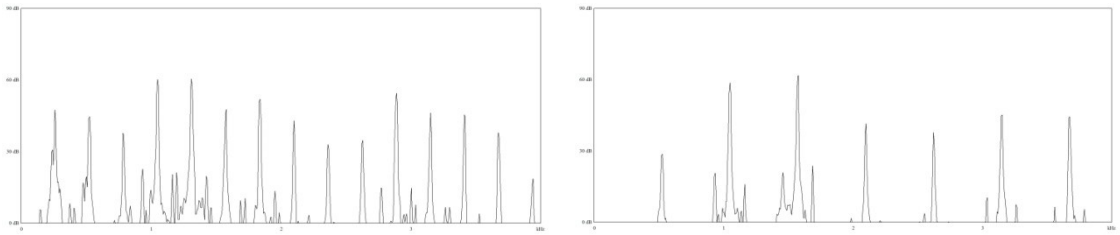


Fig. 5: espectros do oboé: a) dó$_3$ b) dó$_4$

Na figura 6 vemos dois espectros do clarinete, emitindo o sib$_2$ (233,08 Hz) e sol$_2$ (196 Hz). Os outros aerofones apresentados aqui emitem as mesmas frequências das notas escritas, porém o clarinete em si$_b$ (acompanhado de sua família: requinta, clarinete em lá, clarinete alto em mi$_b$ e clarinete baixo em si$_b$) é um instrumento transpositor, de forma que as notas escritas nas músicas são diferentes das notas emitidas. Escreve-se 1 tom acima do que soa.

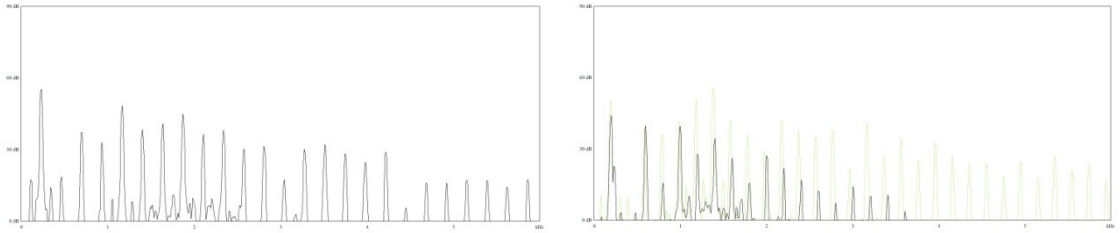


Fig. 6: espectros do clarinete: a) si$_{b2}$ b) sol$_2$

Na figura 6b vemos 2 espectros superpostos do sol$_2$, com emissão forte em verde e emissão piano em preto. Podemos ver que os harmônicos superiores não aparecem no espectro em piano, onde os primeiros harmônicos são bem mais intensos, com rápido decaimento nos harmônicos seguintes.

Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelos auxílios recebidos.

## REFERÊNCIAS

FLETCHER, N. e ROSSING, T. D. *The Physics of Musical Instruments*, New York: Springer, 2008.
GRILLO, M. L. e BAPTISTA, L. R. *Os efeitos acústicos dos aerofones metais*, Tecniacústica, 2014.
GRILLO, M. L. e BAPTISTA, L. R. *Uma abordagem interdisciplinar dos cordofones friccionados,* Tecniacústica, 2012.
GROTHE, T. E KOB, M. *Investigation of basson directivity*, Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, Stockholm, Sweden, 2013.
KÁROLYI, O. *Introdução à Música*, São Paulo: Ed. Martins Fontes Ltda., 2002.
LIMA, F. A. *Elementos Fundamentais da Música*, Rio de Janeiro: Cia. Editora Leitura, 1948.
RIBEIRO, J. A. S. *Sobre os Instrumentos Sinfônicos e em torno deles*, Rio de Janeiro: Ed. Record, 2005.
ROSSING, T. D. *The Science of Sound*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
SADIES. (org.) *Dicionário Grove de Música*, Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1994.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ANÁLISIS ESPECTRAL DEL SONIDO OBTENIDO CON TUDELES DE OBOE FABRICADOS CON DIFERENTES MATERIALES

PACS: 43.75.Ef, 43.66.Jh

I. Navalón Sala[1], M.T. Sala Milvaques[2], C. Blasco-Yepes[3], S. Castiñeira-Ibáñez[4], C. Rubio[5], J.V. Sánchez-Pérez[5]
[1]Conservatorio Profesional de Música Tenor Cortis de Denia (España). isabelnavalonsala@hotmail.com
[2]Centre Professional de Música "Mestre Onofre Diez Monzó" Montserrat, Valencia (España). maiteoboe@gmail.com
[3]Conservatorio Superior de Música Joaquín Rodrigo de Valencia (España). cablasy@gmail.com
[4]Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, València, (España). sercasib@mat.upv.es
[5]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, València, (España). crubiom@fis.upv.es, jusanc@fis.upv.es

## RESUMEN

El oboe produce su sonido gracias a la vibración de una lengüeta doble. Esta lengüeta está formada por la pala (*Arundo donax*) y el tudel. Actualmente, los tudeles se fabrican con diversos materiales. En este trabajo, se realiza un estudio comparando lengüetas ensambladas en el mismo modelo de tudel pero compuesto de diferentes materiales: oro, plata, cobre, latón y rodio, para así ver si los diferentes materiales influyen en la producción del sonido del oboe. Se ha realizado un análisis espectral de varias notas pertenecientes a diferentes registros con la finalidad de comprobar la mejora respecto a su calidad tímbrica.

## ABSTRACT

The oboe's sound is produced by the vibration of its double reed. The double reed constists of two pieces of ARUNDO DONAX cane and the staple. Nowadays, the staples are made of different materials. In this work, a study is made comparing reeds joined in the same staple but constructed with different materials such as, gold, silver, copper, brass and rhodium. The aim is to observe if there is some difference in the tone quality. Moreover, it has been made a spectral analysis of different sounds in different registers in order to observe if there is an improvement in the sound quality.

## 1.- INTRODUCCION

El sonido emitido por un instrumento no es un tono puro sino que es una composición de varias frecuencias siendo una de ellas la fundamental y el resto múltiplos de esa frecuencia, denominados armónicos. El timbre de un sonido es la característica subjetiva que hace posible al oído distinguir entre dos sonidos, de igual frecuencia fundamental e intensidad, emitidos por fuentes de diferente naturaleza [1]. La explicación del significado del timbre radica en el conjunto de armónicos o frecuencias que acompañan a la frecuencia fundamental. Así por ejemplo, nuestro oído es capaz de distinguir un La3 (440 Hz) emitido por un oboe de un La3

emitido por una flauta travesera. Por lo tanto, cuando dos instrumentos emiten a la vez dos sonidos de la misma frecuencia e intensidad, se pueden distinguir perfectamente las notas emitidas por cada uno de ellos.

En el estado estacionario de un sonido el timbre depende de la distribución de potencia sonora en función de la frecuencia, es decir, de cómo se distribuye la potencia sonora entre el modo fundamental y sus armónicos. Para un espectro de potencias con componentes $P_i(f_i)$, el centroide espectral $f_c$, es una frecuencia que se define como:

$$f_c = \frac{\sum f_i P_i}{\sum P_i}$$

La definición guarda analogía con la del centro de masas. Muchos investigadores sostienen que la calidad tímbrica o brillantez está correlacionada con el incremento de potencia de las altas frecuencias. La hipótesis es que la brillantez de dos tonos está simplemente correlacionada con el parámetro *fc* [2] [3].

## 2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS TUDELES EMPLEADOS

### 2.1.- Materiales

El oboe es un instrumento aerófono que necesita de una lengüeta para la producción de su sonido. Esta lengüeta es doble, ya que está formada por dos láminas de madera que vibran a una frecuencia determinada, dependiendo de sus dimensiones, masa y elasticidad. Esta vibración, excita las ondas periódicas de presión de la columna de aire situada dentro del tubo del oboe. La lengüeta está formada por dos palas y un tudel que se unen con hilo de nailon, para luego ser raspada. Un tudel es un tubo cónico sobre los que se montan las palas. Su longitud es de 47 milímetros, aunque existen también de 45 y 46 mm. Su diámetro interior puede variar tanto en su extremo superior como inferior, dependiendo de los fabricantes. Su longitud y los diámetros influyen sobre el timbre, el volumen y la afinación del instrumento.

Los tudeles utilizados en este experimento son los fabricados por Gualco de 47 mm. Y tienen como molde base la forma del tudel Chiarugi 47 2, en diferentes materiales: oro, plata, rodio, cobre y latón (figura 1).



*Figura 1: Tudeles con los distintos materiales: oro, plata, rodio, latón y cobre (ordenados de izquierda a derecha).*

### 2.2.- Características constructivas de los tudeles

Si se observa la parte externa de estos tudeles, aparentemente parecen estar construidos con un único material, pero si observamos las Figura 2 y Figura 3, se puede ver el despiece interno y el corte de sección respectivamente, y se observa que existe una peculiaridad y característica propia de los tudeles en cuestión. En su interior llevan incorporado un "corazón" de madera de ébano, pretendiendo aportar, según las propiedades propias del material, un resultado de *cierta calidez* en el sonido, a diferencia de aquellos tudeles fabricados con un único material.

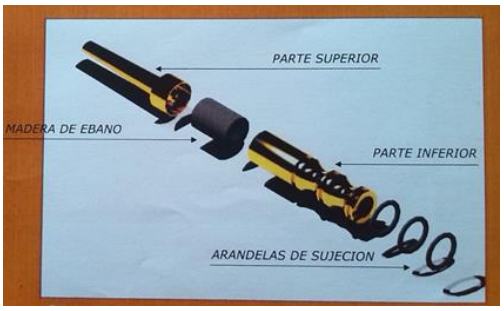



*Figura 2: Despiece.*

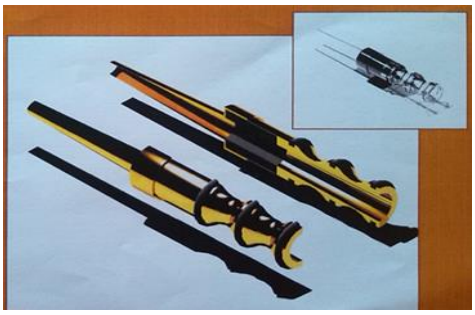


*Figura 3: Corte de Sección.*

### 3.- RECURSOS EMPLEADOS PARA EL EXPERIMENTO

Para el experimento se ha utilizado un oboe Marigaux modelo 2001 con número de serie 03986, fabricado en 2014.

En la elaboración de las lengüetas se ha tenido en cuenta la posible variabilidad del material empleado, por lo que para controlar al máximo la variabilidad de las propiedades de la madera de las cañas, se han extraído todas las palas de las diferentes lengüetas utilizadas en este experimento del mismo tubo. Todas ellas mantienen las mismas características en cuanto a grosor y molde de la pala y longitud total (atadas y cortadas).

- Gubiado interno: 59/100
- Longitud total (atadas): 74 mm
- Longitud total (cortadas): 73 mm
- Diámetro del tubo: 10'25-10'50
- Molde de las palas: RC12
- Fabricante de las palas: Le Rousseau Chantant

En las siguientes figuras 4, 5, 6 y 7 se puede observar el proceso de elaboración de las lengüetas:



*Figura 4: Tubo y corte de las palas.*



*Figura 5: Gubiado de las palas.*

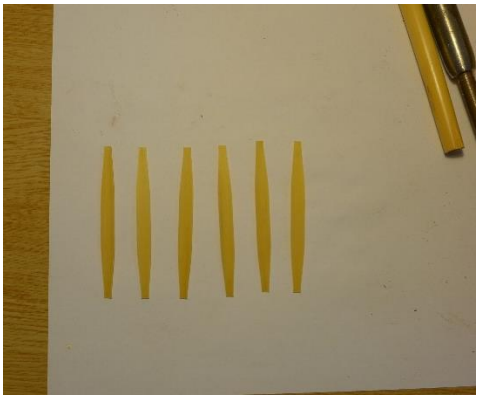


*Figura 6: Palas con forma.*



*Figura 7: Lengüetas atadas.*

Una vez finalizado el proceso de atado de las lengüetas, se rebajaron todas ellas con una máquina de raspado del fabricante George Rieger, todas ellas con el mismo molde de raspado y terminadas poco a poco a mano, teniendo en cuenta en realizar los mismos retoques en cada una de las lengüetas (figura 8).



*Figura 8: Lengüetas raspadas.*

## 4.- SONIDOS ELEGIDOS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS ACÚSTICAS

Para el estudio se han grabado diversas notas, abarcando todo el registro del instrumento (registro grave, medio y agudo). Se han escogido el $Re_3$, $La_3$, $Do_4$, $Do\#_4$ y $Sol_5$. Ejecutadas todas ellas con una dinámica de *mezzoforte* (mf) (figura 9).

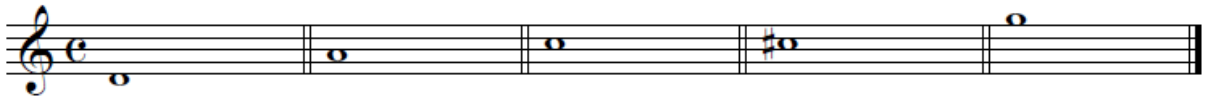


*Figura 9:* Ejemplo musical de las notas del experimento.

## 5.- METODOLOGIA Y RESULTADOS

Las medidas experimentales de este trabajo se han realizado en condiciones controladas, en una cámara anecoica perteneciente al Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València [4], [5]. Una cámara anecoica es una sala diseñada para absorber el sonido que incide sobre las paredes, el suelo y el techo de la misma, anulando los efectos de eco y reverberación del sonido. En este caso, la cámara tiene unas dimensiones de $8 \times 6 \times 3\ m^3$.
En la Figura 1 se muestra un esquema de la cámara y la disposición de los distintos elementos utilizados para llevar a cabo las medidas. El micrófono se encuentra conectado a un analizador donde se registra la señal temporal y posteriormente se realiza la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este analizador está conectado a un ordenador (PC) donde se representan los resultados.

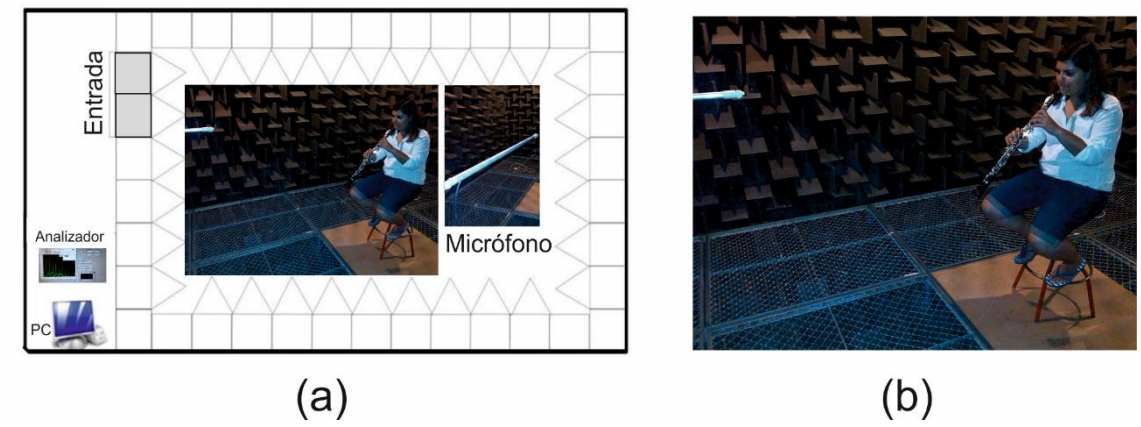



*Figura 10: (a) Conjunto experimental utilizado para las medidas, (b) posición relativa oboe-micrófono en el momento de la medida. Músico Maria Teresa Sala Milvaques.*

Para la adquisición de datos se ha utilizado la tarjeta PCI-4474 de National Instruments. Está diseñada para el análisis, tanto de señales de ruido aéreo como de vibración, consiguiendo poca distorsión y bajo ruido de fondo. Las tarjetas de National Instruments, PCI-4474 y PCI-7334, se utilizan de manera conjunta con dos paquetes de LabVIEW para la adquisición de datos. El análisis, se realiza mediante un analizador FFT que permite obtener la respuesta en frecuencia y los niveles sonoros. Se han utilizado micrófonos pre-polarizados de 1/2" tipo 4189 B&K con una sensibilidad de 49.5 mV/Pa, que permiten analizar un amplio rango de frecuencias. En este trabajo se ha analizado el rango de 0 Hz a 8000 Hz.

En la Figura 11 se muestran las cañas de oboe diseñadas para las medidas experimentales. Se han construido utilizando los seis materiales diferentes respecto al tudel: corcho, oro, plata, rodio, latón y cobre. Las palas utilizadas son del mismo material y provienen todas ellas de la misma caña. La longitud y el atado de las cañas se ha cuidado para no afectar a la afinación.

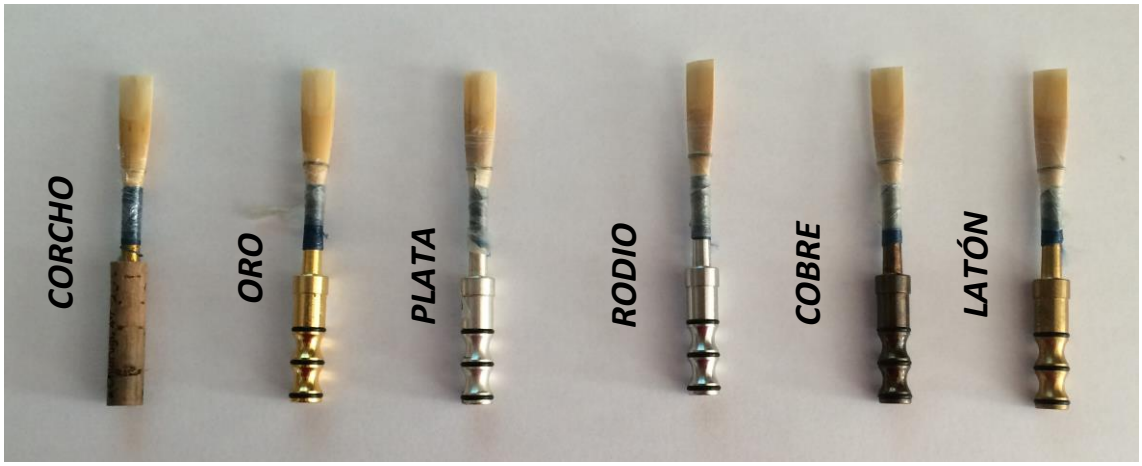



*Figura 11: Tudeles utilizados en las medidas: corcho, oro, plata, rodio, cobre y latón de izquierda a derecha.*

Se han medido los espectros de nivel de presión sonora de varias notas musicales para los tudeles seleccionados y se han comparado con el clásico tudel de corcho. Estos espectros se representan en figuras donde el eje horizontal representa la frecuencia en hercios (Hz) y el eje vertical representa el nivel de presión LP en decibelios (dB). De la comparación de espectros se puede observar si los armónicos han cambiado en posición y/o tamaño, pudiendo valorar este cambio mediante el cálculo del centroide espectral.

En la Figura 12 se compara para la nota Re3 (Re del registro grave del oboe), el tudel de corcho con el tudel de rodio. Como puede observarse en el recuadro, los armónicos en el rango de 5000 a 8000 Hz han cambiado. El centroide obtenido para el tudel de corcho resulta ser de 3098 Hz mientras que para el tudel de rodio es 3257 Hz.

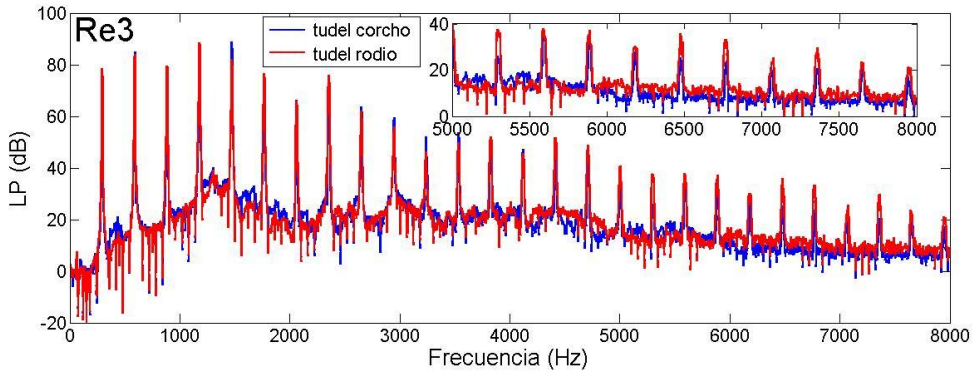



*Figura 12: Espectro de presión en decibelios para la nota Re3, Re del registro bajo del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de rodio (rojo), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz. El recuadro muestra aumentado el espectro para el rango de frecuencias de 5000 a 8000 Hz, para ambos tudeles.*

En la Figura 13: se compara para la nota Re3 (Re del registro grave del oboe), el tudel de corcho con el tudel de plata. Para ver con más detalle los cambios que se producen en el espectro armónico, se presentan aumentados varios rangos de frecuencia de la banda 0 a 8000 Hz. Como se puede observar en la Figura 13.b), rango de 0 a 1000 Hz, la posición del fundamental para ambos tudeles coincide, mientras que en la Figura 13.c) se muestra aumentado el espectro en el rango de frecuencias 3000 a 5000 Hz, apreciándose como los armónicos generados con el tudel de plata se han desplazado levemente hacia altas frecuencias. El centroide espectral para el tudel de corcho resulta de 3098 Hz mientras que para el tudel de plata es de 3363 Hz.

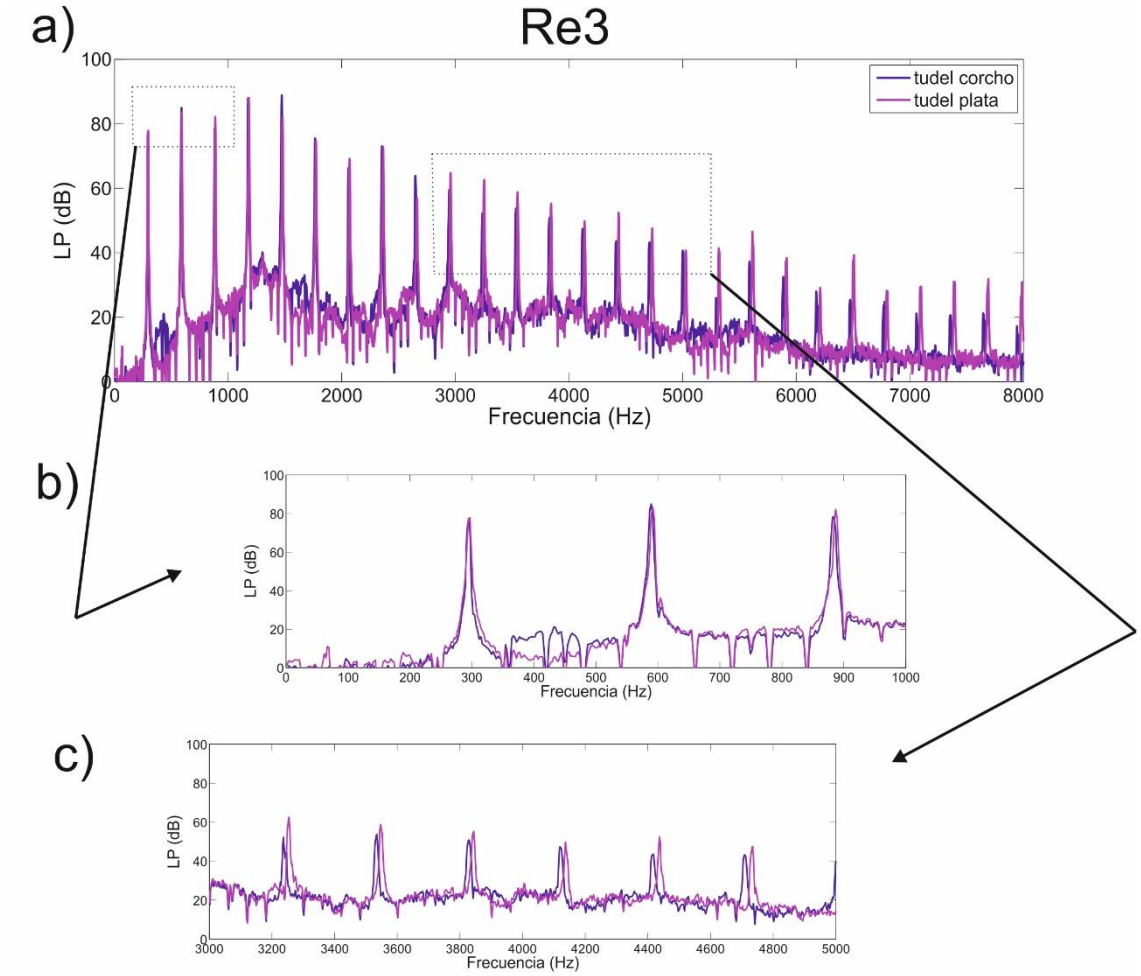



*Figura 13: a) Espectro de presión en decibelios para la nota Re3, Re del registro bajo del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de plata (magenta), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz, b) detalle del espectro mostrado en a) ampliado a bajas frecuencias, rango 0 a 1000 Hz, donde se muestra la posición del fundamental obtenido con ambos tudeles, c) detalle del espectro mostrado en a) ampliado para el rango de frecuencias de 3000 a 5000 Hz, para ambos tudeles.*

En la Figura 14 se compara para la nota Re3 (Re del registro grave del oboe), el tudel de corcho con el tudel de cobre. Como se puede observar en la Figura 14.b) la posición del fundamental para ambos tudeles coincide, mientras que en la Figura 14.c) se muestra aumentado el espectro en el rango de frecuencias 5000 a 8000 Hz, apreciándose como los armónicos generados con el tudel de cobre se han desplazado hacia altas frecuencias e incluso su tamaño ha cambiado. El centroide espectral para el tudel de corcho resulta de 3098 Hz mientras que para el tudel de plata es de 3381 Hz.

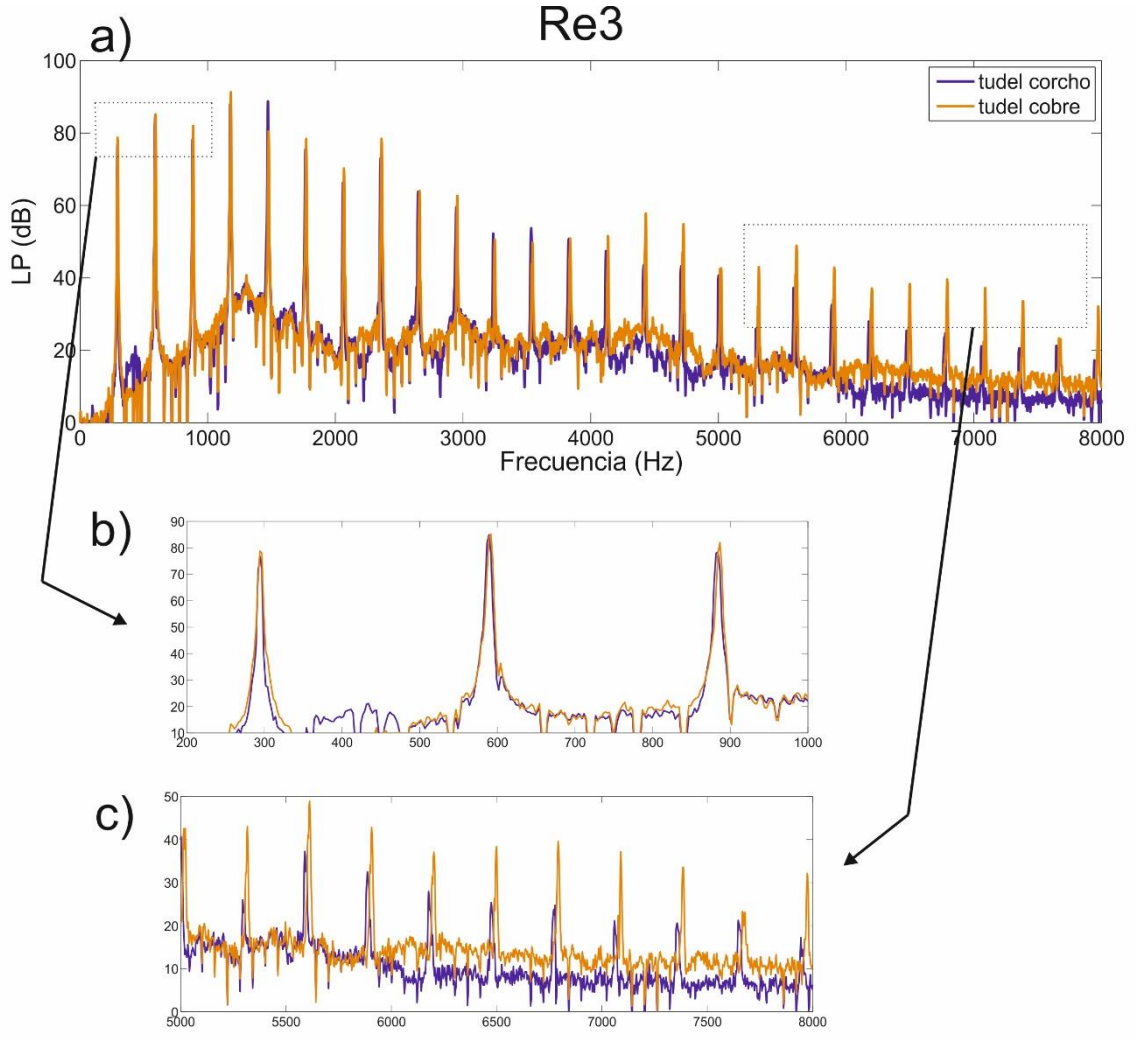



*Figura 14: a) Espectro de presión en decibelios para la nota Re3, Re del registro bajo del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de cobre (marrón), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz, b) detalle del espectro mostrado en a) ampliado a bajas frecuencias, rango 0 a 1000 Hz, donde se muestra la posición del fundamental obtenido con ambos tudeles, c) detalle del espectro mostrado en a) ampliado para el rango de frecuencias de 5000 a 8000 Hz, para ambos tudeles.*

En la Figura 15 se compara para la nota La3 (La del registro medio del oboe), el tudel de corcho con el tudel de oro. Como se puede observar la posición del fundamental para ambos tudeles coincide, mientras que en recuadro se muestra aumentado el espectro en el rango de frecuencias 6000 a 8000 Hz, apreciándose como los armónicos generados con el tudel de oro se han desplazado hacia altas frecuencias. El centroide espectral para el tudel de corcho resulta de 3407 Hz mientras que para el tudel de oro es de 3466 Hz.

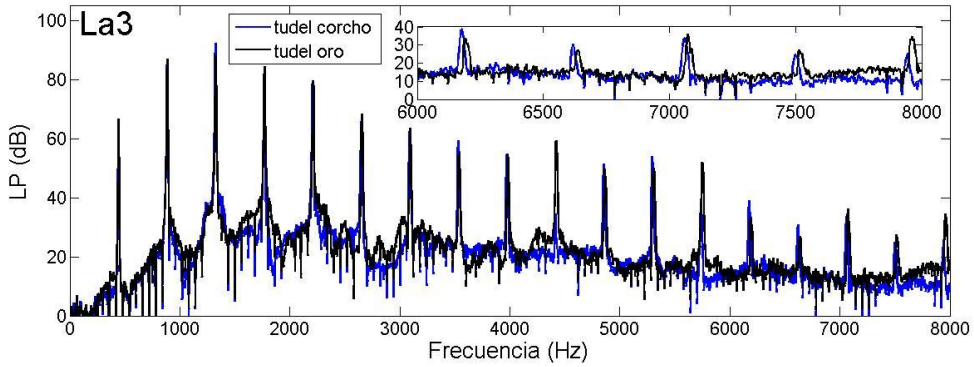



*Figura 15: Espectro de presión en decibelios para la nota La3, La del registro medio del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de oro (negro), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz. El recuadro muestra aumentado el espectro para el rango de frecuencias de 6000 a 8000 Hz, para ambos tudeles.*

En la Figura 16 se compara para la nota Do4 (Do del registro medio del oboe), el tudel de corcho con el tudel de oro. Como se puede observar la posición del fundamental para ambos tudeles coincide, mientras que en recuadro se muestra aumentado el espectro en el rango de frecuencias 4000 a 5000 Hz, apreciándose como los armónicos generados con el tudel de oro han cambiado de tamaño. El centroide espectral para el tudel de corcho resulta de 3557 Hz mientras que para el tudel de oro es de 3610 Hz.

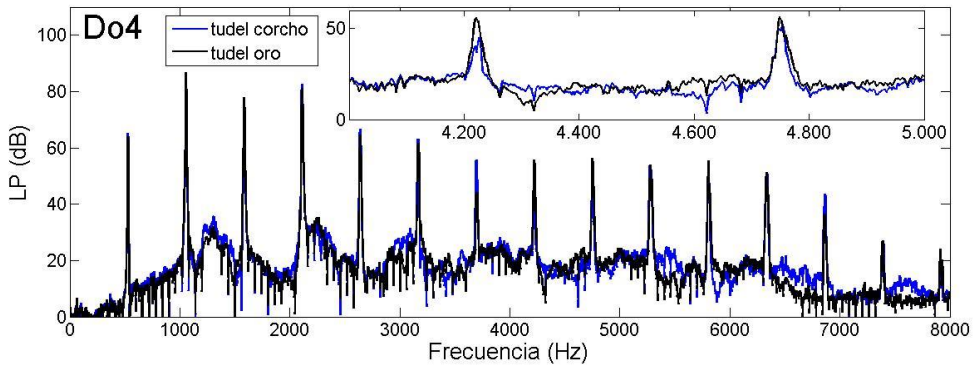



*Figura 16: Espectro de presión en decibelios para la nota Do4, Do del registro medio del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de oro (negro), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz. El recuadro muestra aumentado el espectro para el rango de frecuencias de 4000 a 5000 Hz, para ambos tudeles.*

Por último, en la Figura 17, se compara para la nota Do#4 (Do# del registro medio del oboe), el tudel de corcho con el tudel de oro. Esta nota, al oboísta, le resulta particular. Como se puede observar la posición del fundamental para ambos tudeles coincide, mientras que en recuadro se muestra aumentado el espectro en el rango de frecuencias 4000 a 6000 Hz, apreciándose como los armónicos generados con el tudel de latón han cambiado de tamaño y posición. El centroide espectral para el tudel de corcho resulta de 3212 Hz mientras que para el tudel de latón es de 3239 Hz.

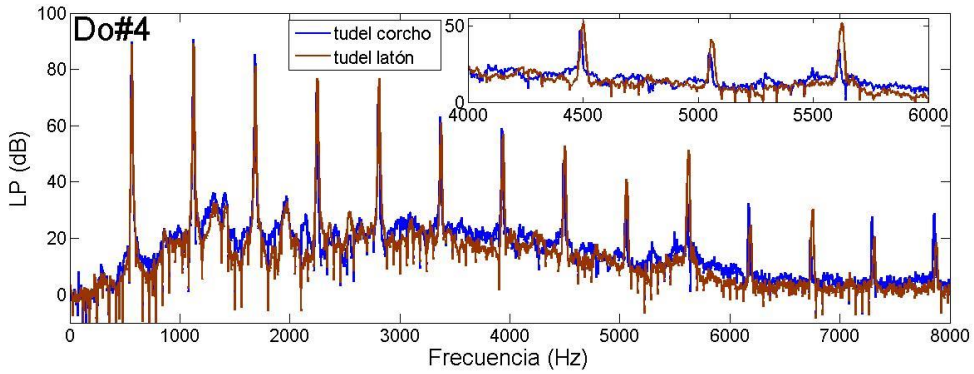



*Figura 17: Espectro de presión en decibelios para la nota Do#4, Do sostenido del registro medio del oboe, obtenido con tudel de corcho (azul) y tudel de latón (marrón), en el rango de frecuencias de 0 a 8000 Hz. El recuadro muestra aumentado el espectro para el rango de frecuencias de 4000 a 6000 Hz, para ambos tudeles.*

## 6.- CONCLUSIONES

Las sensaciones de mejor sonoridad que el instrumentista nota cuando utiliza diferentes tudeles de oboe no son infundadas y se resumen en una posible mejora de la calidad tímbrica. Físicamente se ha comprobado que el espectro armónico cambia con la utilización de un tudel u otro. La utilización de tudeles de diferentes metales cambia de posición el centroide espectral y por lo tanto provoca un cambio de la calidad tímbrica del sonido, con respecto al tudel clásico de corcho. Este cambio, dependiendo del interprete, puede ser beneficioso o en su caso no tanto.

## 7. - BIBLIOGRAFÍA

[1] Llinares J. et al. Acústica , UPV 2008.70

[2] Agos A. et al. Estudio Acústico de instrumentos de viento del folklore vasco, Tecniacústica Gandia (2006)

[3] Benade A. H. *Fundamentals of Musical Acoustics,* Oxford Univ. Press, NY (1976)

[4] C. Rubio C., J. V. Sánchez-Pérez, R. Martínez-Sala, F. Cervera, *Medida de las características de campo libre de una cámara anecoica,* TECNIACÚSTICA, 96-98 (1997)

[5] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J.V. Sánchez-Pérez, R. Pérez Hernández*, Diseño de un tapón de corcho de flauta travesera. Influencia en su calidad tímbrica.* Editorial Sociedad Española de Acústica, TECNIACÚSTICA 2014, 45º Congreso Español de Acústica. 8º Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics, Murcia (2014)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA DEL TUDEL DE OBOE EN LA CALIDAD TIMBRICA

**PACS:** 43.75.Ef

Castiñeira-Ibáñez, Sergio[1]; Rubio, Constanza[2], Sánchez-Pérez, Juan Vicente[2], Fuster Palmer, J[3]

[1]*Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València, Spain, EU, sercasib@mat.upv.es*
[2] *Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València,Spain EU, crubiom@fis.upv.es, jusanc@fis.upv.es*
[3]*Conservatorio Superior de Música de Valencia "Joaquín Rodrigo", Valencia, Spain EU, oboefuster@hotmail.com*

## ABSTRACT

Oboe is a musical instrument with a conical bore, whose sound is produced by the vibration of a double reed which is traditionally called oboe. The oboe's reed consists of two distinct parts: the shank, usually made of brass, and the shovel, made of reed. This paper presents a comparative study of the tone quality efficiency of different bocal tuning designs for the reed of the oboe. Several notes from different records were analysed and the reason of the improvement produced by using one shank or other regarding the tone quality were physically checked.

## RESUMEN

El oboe es un instrumento musical de taladro cónico, cuyo sonido se emite mediante la vibración de una lengüeta doble, denominada tradicionalmente caña de oboe. La caña de oboe está formada por dos partes bien diferenciadas: el tudel, normalmente de latón, y la pala, de caña. En este trabajo se realiza un estudio comparativo de la eficiencia tímbrica de diferentes diseños del tudel de la caña de oboe. Se han analizado varias notas pertenecientes a diferentes registros y se ha comprobado físicamente la razón de la mejora en la calidad tímbrica que produce la utilización de un tudel u otro.

## INTRODUCCION

El oboe es un instrumento musical formado por tres partes: (i) el cuerpo superior o cabeza, que es donde se introduce la caña de oboe. Es la parte más estrecha del instrumento y donde se coloca la mano izquierda, localizándose las llaves de octava.; (ii) la parte central, donde se coloca la mano derecha y donde se localizan la mayoría de las notas graves y (iii) la campana o pabellón, que es la prolongación de la parte central. En la Figura 1, se puede ver un oboe moderno, modelo francés.



Figura 1: La figura muestra un oboe profesional, modelo francés. La caña de oboe se sitúa en el orificio que posee el oboe en su parte superior. En el recuadro se ve con más detalle esta parte, así como la caña completa.

El tudel modelo francés (para oboes Lorée y Marigaux) de la marca comercial Chiarugi 47 2 que se puede ver en la Figura 2(a), tiene las siguientes medidas: óvalo 1.95/2.55 a 47 mm 4.70 espesor de 0.20 a 0.30 mm [1]. Es un tubo de latón con forma troncocónica de 47.00 mm (Figura 2(b)), presentando la parte más estrecha una cierta elipticidad (óvalo) y terminando en la parte más ancha con forma circular. El espesor de la chapa de latón, también cambia, pasando de 0.20 mm en el óvalo a 0.30 mm en la base. Por último, los 29.00 mm de la base del tudel están rodeados de una capa de corcho. Este corcho se utiliza para que la caña quede perfectamente acoplada al oboe.

El tudel prototipo, se ha diseñado a partir del comercial, cambiando la forma geométrica de parte del mismo. Así, como se puede ver en la Figura 2(d), los 18.00 mm medidos desde la base circular del tudel comercial, se han fabricado de forma cilíndrica y los milímetros restantes hasta completar los 47.00 mm, siguiendo la forma cónica tradicional de estos tudeles. En la Figura 2(c) se puede observar el tudel prototipo.

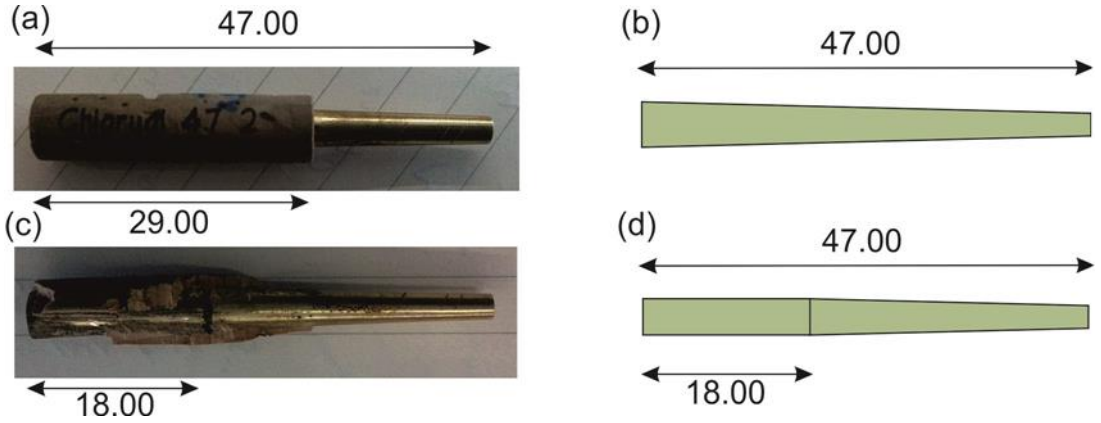



Figura 2: La figura (a) muestra un tudel Chiarugi 47 2. En la figura (b) se representa una sección longitudinal que muestra la forma troncocónica de la pieza de latón que forma la estructura del tudel. La figura (c) muestra el prototipo de tudel diseñado de forma que una parte es troncocónica y otra cilíndrica. En la figura (d) se muestra la sección longitudinal de la estructura de latón para el prototipo diseñado indicando las medidas (mm) más importantes.

El volumen de aire que aproximadamente ocupa el interior del tudel, mostrado en la Figura 2(a), se puede calcular mediante la expresión correspondiente a una figura troncocónica:

$$V = \frac{h\pi}{3}(r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)$$

mientras que en el tudel prototipo, como el de la Figura 2(b), el volumen de aire en su interior será, aproximadamente:

$$V = \frac{h_1 \pi}{3}(r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2) + h_2 \pi r_1^2$$

que corresponde a la suma del volumen de un tronco de cono de altura $h_1$ y un cilindro de altura $h_2$.

Con estas expresiones y teniendo en cuenta las medidas geométricas mostradas en la Figura 3, se obtiene para el tudel comercial un volumen de aire ocupado en su interior de 372.28 mm³ y para el tudel prototipo 467.35 mm³, siendo pues el volumen de aire ocupado en el tudel prototipo un 25.54% mayor que el comercial. Este dato es relevante con vistas a los resultados experimentales obtenidos, como se verá más adelante. Las dimensiones exteriores, el tipo de material de caña utilizado y el raspado, han sido realizados de igual forma para que estos parámetros no influyan en los resultados de las medidas.

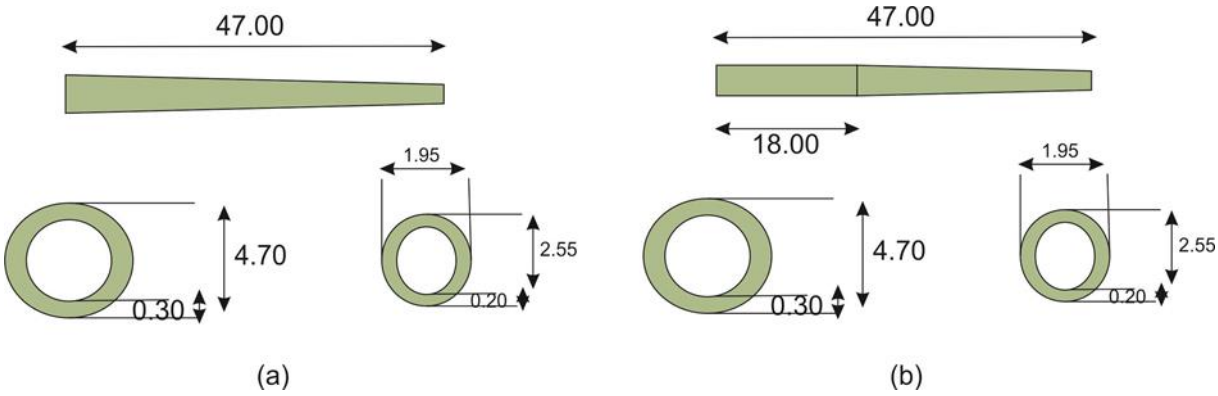



Figura 3: La figura (a) muestra las dimensiones, en mm, de la pieza de latón del tudel comercial Chiarugi 47 2 y la figura (b) las dimensiones de la pieza de latón del tudel prototipo

## METODOLOGIA Y RESULTADOS

Las medidas experimentales de este trabajo se han realizado en condiciones controladas, en una cámara anecoica perteneciente al Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València [2], [3]. Una cámara anecoica es una sala de medidas acústicas donde se pretende que el campo creado en su interior sea lo más parecido al campo acústico libre, evitando asimismo, las posibles interferencias sonoras provenientes del exterior que podrían distorsionar los resultados. En este caso, la cámara tiene unas dimensiones de $8 \times 6 \times 3\, m^3$. En la Figura 4 se muestra un esquema de la cámara y la disposición de los distintos elementos utilizados para llevar a cabo las medidas. Un micrófono se encuentra conectado a un analizador donde se registra la señal temporal. El analizador que está conectado a un ordenador (PC), trata la señal obteniendo su Transformada Rápida de Fourier (FFT) para representar por pantalla los resultados y en su caso comparar unos con otros mediante el programa comercial Matlab. El análisis de esta señal se realiza mediante espectros, donde se representa el nivel de presión sonora en decibelios (dB) frente a la frecuencia en Hercios (Hz).

Para la adquisición de datos se ha utilizado la tarjeta PCI-4474 de National Instruments. Está diseñada para el análisis, tanto de señales de ruido aéreo como de vibración, consiguiendo

poca distorsión y bajo ruido de fondo. Las tarjetas de National Instruments, PCI-4474 y PCI-7334, se utilizan de manera conjunta con dos paquetes de LabVIEW para la adquisición de datos. Se ha utilizado un micrófono pre-polarizado de 1/2" tipo 4189 B&K con una sensibilidad de 49.5 mV/Pa, que permite analizar un amplio rango de frecuencias. En este trabajo se ha analizado el rango de 0 Hz a 5000 Hz.

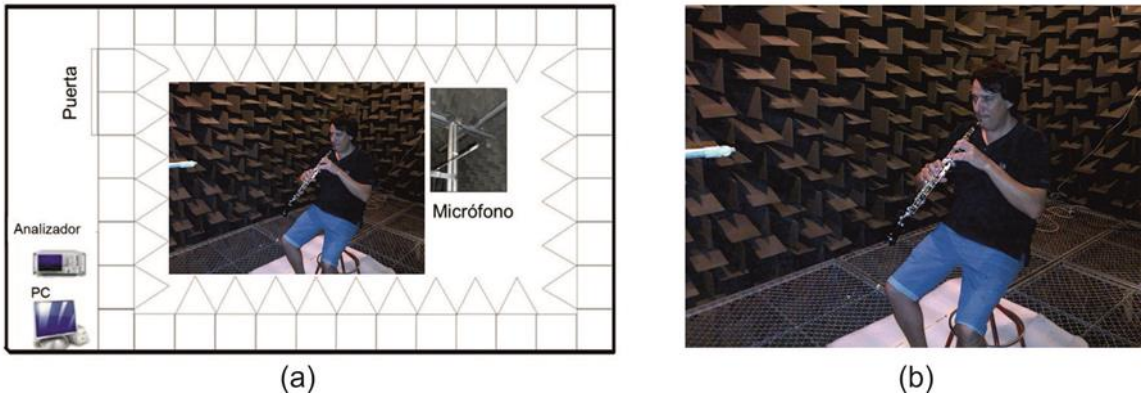



Figura 4: (a) Conjunto experimental utilizado para las medidas. (b) Posición relativa oboe-micrófono en el momento de la medida. Músico D. Jesús Fuster Palmer.

Las medidas se han realizado en dos fases, una por cada tudel de oboe. En ambos casos la posición del corcho en el oboe fue la misma, para no influir en los resultados, debido al cambio de longitud del tubo. La emisión y afinación del sonido también se cuidó, por el mismo motivo. Las notas utilizadas para el análisis fueron tres, una por cada registro: *Re* del registro grave (Re 2), *La* del registro medio (La 3) y *Sol* del registro agudo del oboe (Sol 4).

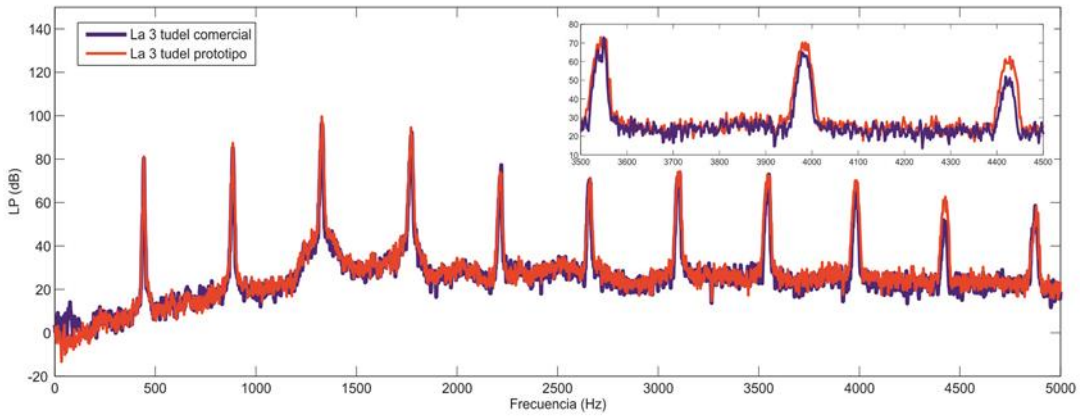



Figura 5: Espectro de nivel de presión en decibelios, de 0 a 5000 Hz para los dos tudeles de oboe analizados. En color azul se representa el espectro de frecuencia para el tudel comercial y en color rojo para el tudel prototipo. Se han obtenido para la nota *La* del registro medio del oboe (La 3). En el recuadro se muestra el rango de frecuencias 3500 - 4500 Hz ampliado. Se pueden ver la posición y tamaño de los armónicos más alejados, respecto al fundamental, para los dos tudeles analizados.

Para las tres notas analizadas, los resultados fueron análogos. Como ejemplo, en la Figura 5 se representa el espectro de nivel de presión sonora, para los dos tudeles y para la nota La del registro medio del oboe (La 3). El nivel de presión sonora (eje de ordenadas) se representa como $LP\ \left(20\ log\frac{p_{rms}}{p_0}\right)(dB)$ frente a la frecuencia en Hz (eje de abcisas).

En el estado estacionario de un sonido el timbre depende de la distribución de potencia sonora en función de la frecuencia, es decir, de cómo se distribuye la potencia sonora entre el modo fundamental y sus armónicos. Para un espectro de potencias con componentes $P_i(f_i)$, el centroide espectral $f_c$, es una frecuencia que se define como:

$$f_c = \frac{\sum f_i P_i}{\sum P_i}$$

En la Figura 5 se puede observar que, cuando se utiliza el tudel prototipo, los armónicos hacia altas frecuencias aumentan de tamaño, es decir, tienen más nivel de presión, lo que provoca un cambio de timbre en el sonido. Se ha calculado la posición del centroide para este espectro [2], [3]. Como se observa en la tabla mostrada en la Figura 6, para el caso de la nota *La* del registro medio con el tudel comercial, el centroide se localiza a $f_c$ =2438 Hz, mientras que para el tudel prototipo, el centroide se localiza a $f_c$ =2471 Hz. La calidad tímbrica o brillantez del sonido ha mejorado, para el tudel prototipo, debido al desplazamiento de la posición del centroide espectral, $f_c$, hacia altas frecuencias, tal y como predice la teoría [4], [5].

| La 3 Oboe | Tudel comercial | | Tudel prototipo | |
|---|---|---|---|---|
| | f(Hz) | LP (dB) | f(Hz) | LP (dB) |
| | 442 | 79,28 | 442 | 81,17 |
| | 884 | 82,98 | 884 | 87,39 |
| | 1326 | 96,44 | 1326 | 99,65 |
| | 1768 | 90,30 | 1768 | 94,57 |
| | 2210 | 75,03 | 2210 | 73,99 |
| | 2652 | 68,46 | 2652 | 71,23 |
| | 3094 | 73,24 | 3094 | 74,41 |
| | 3536 | 68,24 | 3536 | 73,00 |
| | 3978 | 64,80 | 3978 | 70,09 |
| | 4420 | 49,90 | 4420 | 62,63 |
| | 4862 | 56,31 | 4862 | 58,27 |
| fc (Hz) | | 2438 | | 2471 |

Figura 6: Tabla de resultados para los diferentes armónicos de la nota *La* del registro medio del oboe y para los dos tudeles de corcho utilizados. Se muestra el resultado del centroide $f_c$ (Hz) para cada caso.

## CONCLUSIONES

Las sensaciones de mejor sonoridad que el instrumentista percibe cuando utiliza diferentes tudeles de caña de oboe no son infundadas y se resumen en una mejora de la calidad tímbrica. El tudel prototipo, tiene un 25.54 % más de capacidad volumétrica de aire que el comercial. La afinación del instrumento se mantiene mientras que la sensación que el instrumentista dice notar cuando emite mejora. Físicamente se ha comprobado que el espectro armónico cambia con la utilización de un tudel u otro. Se ha comprobado que la utilización del tudel diseñado desplaza el centroide espectral hacia altas frecuencias. Este parámetro permite cuantificar pues, de manera objetiva, la mejora subjetiva apreciada por el instrumentista.

## REFERENCIAS

[1] www.Chiarugi.net
[2] Benade A. H. Fundamentals of Musical Acoustics, Oxford Univ. Press, NY (1976)
[3] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J.V. Sánchez-Pérez, R. Pérez Hernández*, Diseño de un tapón de corcho de flauta travesera. Influencia en su calidad tímbrica.* Editorial Sociedad Española de Acústica, TECNIACÚSTICA 2014, 45º Congreso Español de Acústica. 8º Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics, Murcia (2014)
[4] L.Knopoff, An index for the relative quality among musical instruments, Ethnomusicology **7**(3), 229-233, (1963)
[5] J.W.Beauchamp, Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds: The Sound of Music, Springer, NY (2007)

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# TUNING OF TRANSIENT-EXCITED MUSICAL INSTRUMENTS THROUGH OPTIMIZED STRUCTURAL MODIFICATION AND MODAL TECHNIQUES

PACS 43.75

M. Carvalho (1,2), V. Debut (1), J. Antunes (2)

(1) Instituto de Etnomusicologia - Centro de Estudos em Música e Dança, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Av. de Berna, 26 C, 1069-061 Lisbon, Portugal. *miguel.carvalho@ctn.ist.utl.pt*, *vincentdebut@ctn.ist.utl.pt*

(2) Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Estrada Nacional 10, Km 139.7, 2695-066 Bobadela LRS, Portugal. *jantunes@ctn.ist.utl.pt*

## Abstract

Tuning is a very important aspect for any musical instrument, not only concerning proper pitch but also the tonal quality of the instrument. In this paper, we address bar instruments as an application. Marimbas and vibraphones, have their first bending modes carefully tuned, being typically the first modal frequency ratios of 1:4:10. Such tuning is usually achieved by shaping the bar profiles with precision machine tools, a delicate and highly specialized task. In this paper we investigate the possibility of obtaining similar results using suitably designed tuning masses attached to the bars. Two application areas are illustrated: (1) Obtaining adequate tuning from common bars of constant cross-section loaded with masses; (2) Correcting badly tuned bars with a minimal set of loading masses. From a numerical point of view, such objectives are achieved by coupling structural modification techniques with effective optimization schemes. Two tuning approaches are proposed: the first one uses a full-sized finite element model of the mass-loaded bar, while the second one is based on a very effective reduced model built using the modes of the non-corrected bar. After presenting the developed tuning methods, we illustrate them on the above mentioned applications, based on simulated data. Validation experiments are currently being prepared.

## 1 Introduction

The sound obtained from a struck bar presents numerous partials resulting from the vibrational modes. Typically marimba and vibraphone bars are tuned such that the first three flexural modes display frequency ratios of 1:3:9 or 1:4:10 [1]. At the present time, design and tuning of these instruments is achieved by removing material from the bar, through precision machining tools, which allow the tuner to change locally its mass and stiffness. Based on the empirical knowledge acquired through trial and error procedures, such methods are often inefficient and costly. Benefiting from the growth of computational power, significant advances in physical modeling and optimization procedures have been made in recent years. In the field of music acoustics, these techniques were successfully applied by several researchers, namely for the optimization of bell profiles [2], wind instruments optimization [3, 4, 5], geometrical dimensions of violin components [6] as well as optimal design and numerical simulation of mallet instruments and resonators [7, 8] . However, in all cases, bar tuning is achieved by mass removal, an irreversible and skill demanding task, which makes it unapproachable for non experts.

In this paper we couple optimization procedures with physical modeling techniques in order to explore a new method to tune vibraphone and marimba bars, by attaching suitably designed masses to them, a non-destructive, reversible and relatively effortless approach. Our method was drawn, essentially, to correct poorly tuned bars, with a minimal set of loading masses. With this in mind, we developed a methodology which consists in coupling structural modification techniques with effective optimization schemes, in order to predict the positions and weight of each mass, to comply with a pre-defined target of modal frequencies. Two approaches were used for the computations, the first using Finite Elements modeling (FEM) techniques coupled with optimization strategies, while the second is based in a modal formulation of the problem built from the modal properties of the unloaded bar calculated through FEM. For the bar modeling, a simple Euler-Bernoulli FEM beam model was used, although, the applied optimization techniques can be easily coupled with more refined models if needed.
For the optimization we use a gradient-based local optimization strategy which allows to find the minimum of a multivariable error-function. This optimization technique is fast, however, being gradient-based, it works only with continuous variables and it can get stuck in local minima, frequently being ineffective. For that reason, some strategies were developed in order to overcome these problems which will be discussed in this paper. After describing the physical modeling and the optimization strategies, we present some illustrative cases for which we apply these strategies to the tuning of vibraphone bars, in order to reach target frequencies complying the typical tuning ratios both for continuous and discrete mass variables. The numerical results demonstrate the feasibility of the developed method for the given conceptual system. The effectiveness and robustness of the proposed techniques illustrated by our simulations are quite encouraging. Experimental validation is currently being addressed.

# 2 Physical modeling

In order to predict the dynamical behavior of the system, two different approaches were used for the physical modeling of the bars, namely Finite Elements Method and modal formulation.

## 2.1 Finite Element Modeling

In this section we describe the FEM model for the original bar without the tuning masses referred to as the “original system” and the modeling of the system modified by additional masses attached to the bar - the “modified system”.

### 2.1.1 Original bar without masses

For the original system (i.e. the model of the bar without tuning masses), in order to study the lowest three flexural modes of interest, we used the Euler-Bernoulli beam model, which for a bar with variable cross-section $BH(x)$ is formulated as [9]:

$$\rho A(x)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI(x)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) = 0, \tag{1}$$

where $\rho$ is the density of the bar material, $A(x) = BH(x)$ is the cross-sectional area of the bar, $y$ is the flexural movement, *E* is the Young modulus, and $I(x) = \frac{BH(x)^3}{12}$ is the bar flexural moment of inertia. Finite element discretization of Eq. (1) enables the computation of the elementary stiffness and mass matrices, which after assembling leads to the dynamical formulation of the bar in terms of the physical coordinates:

$$[M_{os}]\{\ddot{Y}(t)\} + [K_{os}]\{Y(t)\} = \{0\}. \tag{2}$$

Here $[M_{os}]$ and $[K_{os}]$ are the global mass and stiffness matrices of the “original system” and $\{Y\}$ is the vector of physical displacements. From the mass and stiffness properties of Eq. (2), the bar modal

frequencies $\omega_m$ and modeshapes $\{\varphi_m\}$ were computed assuming harmonic solutions:

$$\{Y(t)\} = \{\varphi_m\} exp(i\omega_m t), \tag{3}$$

and solving the generalized eigenvalue problem with the classic formulation:

$$\big( -\omega_m^2 [M_{os}] + [K_{os}] \big) \{\varphi_m\} = \{0\}. \tag{4}$$

### 2.1.2 Bar with additional tuning masses

Modeling of the system modified by additional masses attached to the bar can be achieved in terms of the physical coordinates as:

$$[M_{os}]\{\ddot{Y}(t)\} + [K_{os}]\{Y(t)\} = -[M_{ad}]\{\ddot{Y}(t)\}, \tag{5}$$

where $[M_{ad}]$ is the mass matrix of the additional point masses $m_p$ at p = 1, 2, ... , P locations, a diagonal matrix with terms corresponding to the locations of the additional masses, where $M_{ad}(p,p) = m_p$. Thus, from (5), we obtain the following formulation for the "modified system":

$$[M_{ms}]\{\ddot{Y}(t)\} + [K_{os}]\{Y(t)\} = \{0\}, \tag{6}$$

where:

$$[M_{ms}] = [M_{os}] + [M_{ad}]. \tag{7}$$

Similarly to the original system, the modal frequencies and corresponding modeshapes were computed through a generalized eigenvalue problem as described by:

$$\big( -\omega_m^2 [M_{ms}] + [K_{os}] \big) \{\varphi_m\} = \{0\}. \tag{8}$$

## 2.2 Modal-based modeling

A modal formulation of the system dynamics is surely well-suited for the aims of this work since it provides a physical model with a reduced number of equations and consequently requires less computational efforts.

### 2.2.1 Original bar without masses

To obtain the modal formulation for the basic system, we can reformulate (2) through the transformation:

$$\{Y(t)\} = [\Phi_{os}]\{Q(t)\}, \tag{9}$$

where $[\Phi_{os}] = [\{\varphi_{os1}\}\{\varphi_{os2}\}, ..., \{\varphi_{osn}\}]$ obtained in (4) and $Q(t)$ is the vector of the modal amplitudes. After multiplication by $[\Phi_{os}]^T$, and using the classical orthogonality properties, we obtain the following modal formulation for the original system:

$$[\mathcal{M}_{os}]\{\ddot{Q}(t)\} + [\mathcal{K}_{os}]\{Q(t)\} = \{0\}, \tag{10}$$

where:

$$[\mathcal{M}_{os}] = [\Phi_{os}]^T [M_{os}][\Phi_{os}] \tag{11}$$

$$[\mathcal{K}_{os}] = [\Phi_{os}]^T [K_{os}][\Phi_{os}], \tag{12}$$

are the diagonal modal mass and modal stiffness matrices of the original system. Moreover, in order to improve the results accuracy, the stiffness matrix $[\mathcal{K}_{os}]$ used for the computations was built as:

$$[\mathcal{K}_{os}] = [\mathcal{M}_{os}][\omega_{exp}^2], \tag{13}$$

being $[\omega_{exp}^2] = diag(\{\omega_1^2, \omega_2^2, ..., \omega_n^2\})$, where $\omega_n = 2\pi f_n$ is the angular frequency of mode index $n$, obtained through experimental modal analysis of a laboratory bar.

### 2.2.2 Bar with additional tuning masses

The modal formulation for the modified system can be obtained by applying the methodology described from (9) to (12) to the modal formulation of the modified system given in (6), thus resulting in:

$$[\mathcal{M}_{ms}]\{\ddot{Q}(t)\} + [\mathcal{K}_{os}]\{Q(t)\} = \{0\}, \tag{14}$$

where:

$$[\mathcal{M}_{ms}] = [\Phi_{ms}]^T[M_{ms}][\Phi_{ms}] = [\Phi_{ms}]^T([M_{os}] + [M_{ad}])[\Phi_{ms}] \tag{15}$$

$$[\mathcal{K}_{ms}] = [\Phi_{ms}]^T[K_{os}][\Phi_{ms}]. \tag{16}$$

However, a clever and more economical solution for obtaining the modes of the mass-loaded system, most suitable for performing optimization iterations, may be devised directly from the modes of the original system. Starting from Eq. (5) and using Eq. (9), one obtains:

$$[M_{os}][\Phi_{os}]\{\ddot{Q}(t)\} + [K_{os}][\Phi_{os}]\{Q(t)\} = -[M_{ad}][\Phi_{os}]\{\ddot{Q}(t)\}, \tag{17}$$

hence, pre-multiplying by $[\Phi_{os}]^T$:

$$[\mathcal{M}_{os}]\{\ddot{Q}(t)\} + [\mathcal{K}_{os}]\{Q(t)\} = -[\Phi_{os}]^T[M_{ad}][\Phi_{os}]\{\ddot{Q}(t)\}, \tag{18}$$

obtaining:

$$\big([\mathcal{M}_{os}] + [\Phi_{os}]^T[M_{ad}][\Phi_{os}]\big)\{\ddot{Q}(t)\} + [\mathcal{K}_{os}]\{Q(t)\} = 0 \tag{19}$$

yielding to the modified eigenvalue problem for the mass-loaded system:

$$\big( - \omega_m^2\big([\mathcal{M}_{os}] + [\Phi_{os}]^T[M_{ad}][\Phi_{os}]\big) + [\mathcal{K}_{os}]\big)\{\varphi_m\} = \{0\}. \tag{20}$$

Notice that, because formulation (20) is already based on the reduced model of the original system, the computation of the mass-loaded modes using (20) is much more economical than the equivalent - but much larger - eigenvalue computation (8). Actually, an improvement of at least one order of magnitude in computation time is achieved when performing optimizations using the modal approach, comparing to the FEM.

# 3 Optimization strategies

Essentially, an optimization problem consists in finding the values of a set of variables that maximize or minimize an error-function. Most of the optimization problems can be formulated in several different manners using different strategies. In this study we used a deterministic local optimization method which proved to be effective [10]. Local optimization algorithms are gradient based and try to find the nearest local optimal solution. This is a fast method, but it is prone to get stuck in local minima. Therefore, some strategies were developed in order to avoid this problem. Moreover, being gradient based, it implies the use of continuous variables for the optimization. This allows accurate results, however, experimental work often becomes very costly and time consuming when working with continuous mass variables, since it would imply manufacturing *n* customized masses for each experiment. Then, for practical reasons, we also developed a discrete optimization strategy, in order to avoid the use of nonstandard mass devices for the experimental validation, which is now being prepared.

## 3.1 Continuous optimization

For the continuous optimization strategy our aim is to find the optimal mass values $M_n^* = \{m_1^*, m_2^*, ..., m_n^*\}$, (where $m_n \geq 0$) and their respective optimal positions $L_n^* = \{\ell_1^*, \ell_2^*, ..., \ell_n^*\}$ (with

$0 \leq \ell_n \leq L$) for a given number *n* of masses required to minimize the differences between the actual modal frequencies of the system and a given set of target frequencies. We used a multivariable function optimization approach in order to minimize the error-function $\mathcal{E}(M_n, L_n)$:

$$\mathcal{E}(M_n, L_n) = \sum_{j=1}^{J} \left| \frac{\omega_j^{\bigstar} - \omega_j(M_n, L_n)}{\omega_j^{\bigstar}} \right|, \tag{21}$$

where $J$ is the number of modes to optimize, $\omega_j^{\bigstar}$ are the target frequencies, and $\omega_j(M_n, L_n)$ are the computed modal frequencies for the mass values $M_n$ and their respective positions $L_n$. As mentioned above, depending on the initial solution given, the algorithm tends to get trapped in a local minimum. In order to overcome this problem, we repeated the optimization process several times using random initial positions and mass values. Thus, several different initial solutions lead to several error values $\mathcal{E}(M_n, L_n)$. In the end, the minimal error value $\mathcal{E}(M_n, L_n)$ gives the optimal solution $(M_n^*, L_n^*)$.

## 3.2 Discrete optimization

For the practical reasons mentioned above, we developed a discrete optimization strategy which combines continuous position variables $L_n$ with a set of *n* predefined discrete mass values $M^d = \{m_1^d, m_2^d, ..., m_N^d\}$, in order to find the discrete optimal solutions $M_n^{d*}$, with $m_n^d \in Md$, and respective positions that minimize (21). In this work we used a standard approach to solve discrete optimization problems, which consists in three basic steps [11]. First, a continuous optimization of the problem is performed in order to find the continuous optimal solution $L_n^*$ and $M_n^*$. Likely, the found continuous mass values $M_n^*$ do not belong to the predefined set of discrete possible mass values $M^d$. Thus, for each found $M_n^*$ variable, the upper and lower closest discrete values belonging to $M^d$ are then searched, thereby creating two possibilities for each variable. Secondly, for each possible set of discrete variables combination, a continuous optimization is performed in order to establish a new optimum value for the continuous position variables $L_n^*(M_n^d)$. Finally, the comparison of the optimization results for the several discrete value combinations allows us to find the optimal solution $(L_n^*, M_n^{d*})$ of the discrete problem.

# 4 Applications

In this section we illustrate the computations used in order to obtain typical vibraphone bar tuning ratios of 1:4:10 for the first three modes, having as starting point both an untuned vibraphone bar of variable cross section and a uniform cross section aluminium bar. In all cases, for the FEM modal computations, we used a mesh consisting of 64 elements and the values of 710 GPa and 2750 Kg/m$^3$ for the Young modulus and density, respectively.

## 4.1 Tuning a vibraphone bar

Here we present the optimization results for the tuning of a vibraphone bar of variable cross section, using the developed continuous and discrete optimization strategies previously described. The modeled bar dimensions are 0.45 m (length), 0.04 m (width) and variable heights between 1 and 0.042 m, with a total mass of about 1 Kg. The original fundamental frequency of the bar was of 271Hz (frequency of musical note C#), and tuning ratios 1:4.2:11.2 for the first three modes. In this case, the aim was to obtain the tuning ratios of 1:4:10, and 261Hz (frequency of musical note C) for the fundamental frequency, which corresponds to correct tuning modal errors of 4%, 8% and 14%, respectively.

### 4.1.1 Continuous optimization

Figures 1 and 2 show, in blue, the modeled bar profile and, in red, the tuning masses and respective positions required to achieve the target tuning, given by the FEM and modal formulation optimization approaches. For illustration, we represent the tuning mass heights, assuming that its lengths

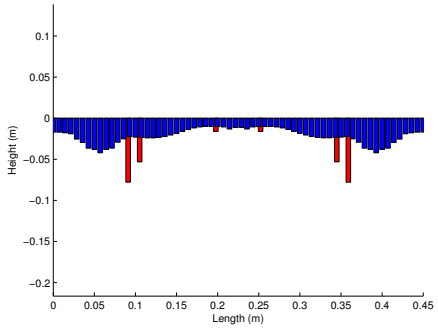



Figure 1: FEM continuous optimization results $(M_n^*, L_n^*)$. Blue: original bar profile; Red: additional tuning masses.

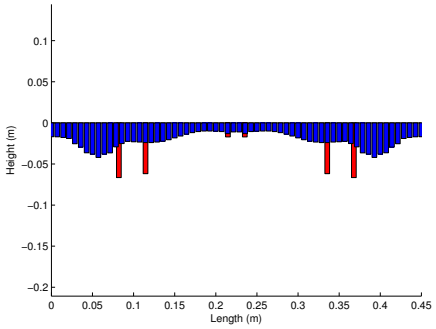



Figure 2: Modal continuous optimization results $(M_n^*, L_n^*)$. Blue: original bar profile; Red: additional tuning masses.

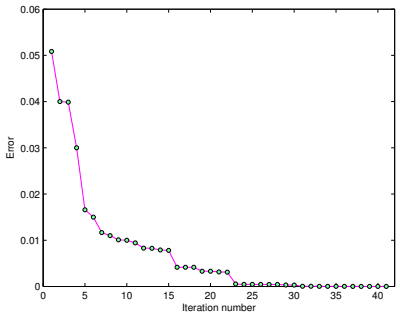



Figure 3: Error value $E(M_n, L_n)$.

| Mass number | Optimal solution | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | FEM | | | | Modal | | | |
| | Continuous | | Discrete | | Continuous | | Discrete | |
| | $L_n^*$ | $M_n^*$ | $L_n^*(M_n^{d^*})$ | $M_n^{d^*}$ | $L_n^*$ | $M_n^*$ | $L_n^*(M_n^{d^*})$ | $M_n^{d^*}$ |
| **1** | 0.091 | 0.116 | 0.098 | 0.110 | 0.082 | 0.084 | 0.083 | 0.090 |
| **2** | 0.105 | 0.066 | 0.107 | 0.060 | 0.115 | 0.086 | 0.113 | 0.090 |
| **3** | 0.198 | 0.013 | 0.205 | 0.010 | 0.215 | 0.009 | 0.206 | 0.010 |
| **4** | 0.252 | 0.013 | 0.245 | 0.010 | 0.235 | 0.009 | 0.244 | 0.010 |
| **5** | 0.345 | 0.066 | 0.343 | 0.060 | 0.335 | 0.086 | 0.337 | 0.090 |
| **6** | 0.359 | 0.116 | 0.352 | 0.110 | 0.368 | 0.084 | 0.366 | 0.090 |

Table 1: Computed Mass values and respective positions using the FEM and modal optimization approaches for both continuous and discrete optimization strategies.

and widths are the same as those of each element of the mesh (0.007m and 0.4m respectively), corresponding to the continuous optimal mass values $M_n^*$ and positions $L_n^*$ presented in Table 1, in a total of 0.390 Kg and 0.358 Kg for the FEM and modal approaches respectively. As seen, different solutions were found for each approach, meaning the existence of several solutions that comply with the target tuning, and that different local minima were accepted as the solution for each case. Furthermore, Figure 3 displays a typical evolution of the error during the optimization process, illustrating the correct behavior of the optimization process.

Table 2 shows the relative errors for the first three modes, relative to the ideal tuning ratios 1:4:10,

| Modo | Target ratio | Relative error in modal frequencies (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Original | FEM | | Modal | |
| | | | Continuous | Discrete | Continuous | Discrete |
| **1** | 1 | 3.8 | $1.9\ 10^{-5}$ | $4.0\ 10^{-2}$ | $9.5\ 10^{-6}$ | $2.4\ 10^{-2}$ |
| **2** | 4 | 8.3 | $2.1\ 10^{-4}$ | $1.6\ 10^{-1}$ | $5.8\ 10^{-6}$ | $7.0\ 10^{-2}$ |
| **3** | 10 | 14 | $1.6\ 10^{-5}$ | $3.4\ 10^{-2}$ | $2.7\ 10^{-5}$ | $1.2\ 10^{-1}$ |

Table 2: Modal errors for the first three modes, relative to the target frequency ratios of 1:4:10, using three different optimization approaches (continuous FEM, discrete FEM, continuous modal and discrete modal optimization).

before and after the optimizations. FEM and modal optimization approaches similarly provide results with great accuracy, illustrating the effectiveness of both developed approaches. However, the modal formulation allows faster computation times, since it is able to significantly reduce the number of equations needed to represent the system (in this case 7 equations).

#### 4.1.2 Discrete optimization

We now turn to the results achieved through the discrete optimization strategy obtained using, initially, the respective continuous optimal solution $(M_n^*, L_n^*)$, presented in Section 3.1. In this case, we predefined a set of discrete masses $M^d = \{m_1^d, m_2^d, ..., m_n^d\}$, in the range between 0 and 0.3 Kg, with a step increase of 10 grams per mass, obtaining as optimal solution the discrete values $M_n^{d*}$ and respective positions $L_n^*$ presented in Table 1. By comparing the continuous and discrete optimal solutions, we can see that the mass values of the continuous solution were rounded to the closest upper or lower mass values pertaining to the predefined set of discrete masses $M^d$. Also, the continuous optimal position solutions $L_n^*$ obtained with the continuous optimization strategy were slightly adjusted in order to find the minimal error $\mathcal{E}(M_n, L_n)$. In Table 2 we can see that the tuning errors are larger than those obtained through the continuous optimization strategy as one would expect because of the limitations of the available masses. However, errors less than 1.6 $10^{-1}$% still are very accurate results, which would result in inaudible tuning errors.

### 4.2 Obtaining a vibraphone bar from an uniform bar

Here we illustrate the computations to obtain typical vibraphone bar tuning with ratios of 1:4:10 for the first three modes, having as starting point an uniform cross section alluminium bar with 0.5 m length, 0.06 m width and 0.02 m height and a mass of 1.8 Kg. The bar fundamental frequency is 412 Hz, and the original frequency ratios for the first three modes are 1:2.8:5.4. This corresponds to correct tuning errors of 106%, 42% and 11%, for the three modes of interest, which represents a far larger decrease of the modal frequencies than in sections 4.1.1 and 4.1.2.

#### 4.2.1 Continuous optimization

The tuning masses and respective positions required to achieve the target tuning, given by the FEM and modal formulation optimization approaches are represented in Figures 4 and 5. In this cases, for representative purposes, we calculated the punctual tuning masses heights, assuming lengths of three times the length of a mesh element and widths equal to those of each element of the mesh and a density of 7850 Kg/m$^3$ (density of stainless steel). The corresponding continuous optimal mass values $M_n^*$ and respective positions $L_n^*$ are presented in Table 3. As expected, heavier masses were needed in this case, for the big change of frequencies required to comply with the predefined target

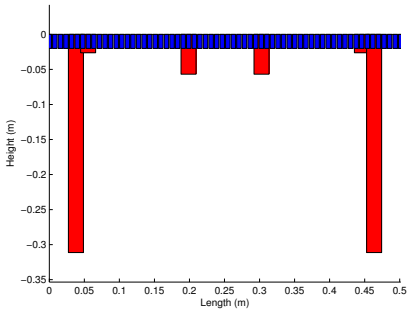



Figure 4: FEM continuous optimization results $(M_n^*, L_n^*)$. Blue: original bar profile; Red: additional tuning masses.

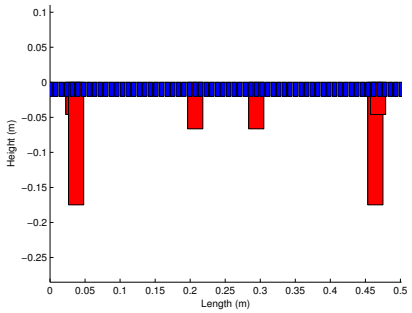



Figure 5: Modal continuous optimization results $(M_n^*, L_n^*)$. Blue: original bar profile; Red: additional tuning masses.

tuning. However, as we can see in Table 4, despite the large original mistuning, both FEM and modal approaches allow accurate results, demonstrating that the developed tuning approaches can be used not only for relatively small tuning corrections but also for substantial ones. Once again, different solutions, with total masses of 7.4 Kg and 5.0 Kg (for the FEM and modal approaches respectively) were found for each approach, which means that different local minima were accepted as the optimal solution for each case.

| **Mass number** | **Optimal solution** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **FEM** | | | | **Modal** | | | |
| | Continuous | | Discrete | | Continuous | | Discrete | |
| | $L_n^*$ | $M_n^*$ | $L_n^*(M_n^{d^*})$ | $M_n^{d^*}$ | $L_n^*$ | $M_n^*$ | $L_n^*(M_n^{d^*})$ | $M_n^{d^*}$ |
| **1** | 0.038 | 3.225 | 0.038 | 3.220 | 0.033 | 0.287 | 0.032 | 0.290 |
| **2** | 0.055 | 0.069 | 0.055 | 0.070 | 0.037 | 1.715 | 0.037 | 1.720 |
| **3** | 0.199 | 0.407 | 0.199 | 0.410 | 0.207 | 0.514 | 0.208 | 0.520 |
| **4** | 0.303 | 0.407 | 0.303 | 0.410 | 0.294 | 0.514 | 0.293 | 0.520 |
| **5** | 0.446 | 0.069 | 0.446 | 0.070 | 0.464 | 1.715 | 0.464 | 1.720 |
| **6** | 0.464 | 3.225 | 0.464 | 3.220 | 0.468 | 0.287 | 0.469 | 0.290 |

Table 3: Computed optimal mass values and respective positions using the FEM and modal approaches for both continuous and discrete optimization strategies.

| **Modo** | **Target ratio** | **Relative error in modal frequencies (%)** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Original** | **FEM** | | **Modal** | |
| | | | Continuous | Discrete | Continuous | Discrete |
| **1** | 1 | 3.8 | $5.5\ 10^{-6}$ | $4.7\ 10^{-2}$ | $1.2\ 10^{-8}$ | $1.4\ 10^{-3}$ |
| **2** | 4 | 8.3 | $6.8\ 10^{-5}$ | $1.6\ 10^{-1}$ | $2.9\ 10^{-6}$ | $1.1\ 10^{-2}$ |
| **3** | 10 | 14 | $2.9\ 10^{-6}$ | $2.7\ 10^{-2}$ | $7.3\ 10^{-6}$ | $3.1\ 10^{-3}$ |

Table 4: Relative errors in modal frequencies for the first three modes, relative to the target frequency ratios of 1:4:10, using four different strategies (continuous FEM, discrete FEM, continuous modal and discrete modal optimization).

#### 4.2.2 Discrete optimization

The discrete optimization strategy was performed starting from the FEM and modal continuous optimal solutions $(M_n^*, L_n^*)$ presented in Table 3 and predefining a set of discrete masses $M^d$ as in section 5.1.2, but this time for masses between 0 and 4 Kg. Also in this case, the tuning errors presented in Table 2 allow us to conclude that a very precise tuning can also be achieved with the discrete strategy.

# 5 Conclusions

In this work, we coupled physical modeling with optimization strategies in order to develop a methodology for the tuning of several transient-excited musical instruments. The methodology was illustrated with numerical calculations and the results show the effectiveness and robustness of the developed tuning techniques for two different conceptual cases. The use of gradient based local optimization methods, and particularly when combined with the modal formulation approach allows very fast computations. Being non-destructive and applicable to several musical instruments, we believe that these techniques can be very useful for musical instruments industry in the future. Experiments are being prepared in order to validate the presented tuning techniques.

# References


[1] Bork, I., 1995. Practical Tuning of Xylophone Bars and Resonators. *Applied Acoustics*, 46, 103-127.

[2] Schoofs, A, Asperen, F., Maas P., and Lehr, A., 1987. A carillon of major-third bells: Computation of bell profiles using structural optimization. *Music Perception*, 4, 245-254.

[3] Kausel, W., 2001. Optimization of Brasswind Instruments and its Application in Bore Reconstruction. *Journal of New Music Research*, 30(1), 69-82.

[4] Debut, V., Kergomard, J. and Laloe, F., 2005. Analysis and optimization of the tuning of the twelfths for a clarinet resonator. *Applied Acoustics*, 365-409.

[5] Noreland, D., Kergomard, J., Laloë, F., Vergez, C., Guillemain, P. and Guilloteau, A., 2013. The logical clarinet: numerical optimization of the geometry of woodwind instruments. *Acta Acustica united with Acustica*, 99, 615-628.

[6] Carlsson, P. and Tinnsten, M., 2002. Numerical optimization of geometrical dimensions and determination of material parameters for violin tops. Forum Acusticum 2002, Sevilla, 16-20 September.

[7] Henrique L., and Antunes, J., 2003. Optimal Design and Physical Modelling of Mallet Percussion Instruments. *Acta Acustica United With Acustica*, 89, 948-963.

[8] Lambourg, C. and Chaigne, A., 2001. Time-domain simulation of damped impacted plates: Part 2 - Numerical model and results. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 1433-1447.

[9] Inman, J., 2001. Engineering Vibration. *Upper Saddle River*, Prentice Hall.

[10] Gill, P., Murray, W. and Wright, M. 1981. Practical Optimization, London, Academic Press.

[11] Venkataraman, 2002. Applied Optimization with MATLAB Programming. *John Wiley and Sons*, New York.


# Acknowledgments


This work was supported by the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) under the Grant Research Project PTDC/EMS-SIS/3255/2012. Miguel Carvalho and Vincent Debut also acknowledge the support from the grants FCT-SFRH/BD/91435/2012 and FCSH/INET-md/UID/EAT/00472/2013.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# GESTIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINO A TRAVÉS DE MODELIZACIONES

REFERENCIA PACS: 43.30.-Nb. Ruido en el agua; mecanismos de generación y características del campo

Pérez Gimeno, N.[1,2]; Martínez Aragón, J.F. [1,2], Cueto Ancela, J.L.[1], Hernández Molina, R. [1]
1. Institución: Laboratorio de Ingeniería Acústica de la Universidad de Cádiz.
Dirección: CASEM - Laboratorio de Ingeniería Acústica Campus Universitario de Puerto Real.
Población: Puerto Real, 11510. Cádiz
País: España
Tel./Fax: 956 01 60 51
E-mail: neus.perez@uca.es
2. Institución: Consultoría acústica "*Servicios Acústicos"*.
Dirección: C/ San Alejandro, 17, Bajo A.
Población: Puerto Real, 11510. Cádiz
País: España
Tel./Fax: 956 92 48 85
E-mail: neus.perez@serviciosacusticos.es

**ABSTRAC:**
To manage the acoustic affection from a marine activity, the main objective of any underwater acoustic study is to evaluate the acoustic capacity and sensibility of an area.
A marine activity emission would generate acoustic disturbance in an existing background noise. The knowledge of oceanographic and bathymetric parameters, environmental noise, activity sound characterization, receiver's location as well as threshold levels are necessary for the completion of an underwater acoustic study developed through acoustic models.
This presentation describes general observations the development of an underwater acoustic study through acoustic models.

**RESUMEN:**
El objetivo de un estudio de impacto acústico submarino es evaluar la compatibilidad de una actividad con la capacidad acústica del área y su sensibilidad, para poder gestionar situaciones de afección.
La emisión de una actividad marina atañerá una perturbación en un entorno con ruido oceánico existente. Para el desarrollo de una evaluación de impacto acústico a través de modelizaciones será preciso conocer además de parámetros oceanográficos y batimétricos, la caracterización acústica del ruido ambiente y de la actividad a implantar así como presencia de receptores, umbrales de afección, etc.
Esta presentación propondrá las principales pautas para elaborar un estudio de impacto acústico submarino a través de modelizaciones

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de un Estudio de Impacto Acústico Submarino es evaluar la compatibilidad de una actividad con la capacidad acústica del área y su sensibilidad, y así poder gestionar situaciones de afección. La evaluación del alcance del impacto por ruido de una actividad, requiere por tanto, de la realización de una estimación de las emisiones acústicas y el análisis de los niveles de ruido que se producen en el entorno de los focos, de manera que se determinen las

superaciones o no de límites establecidos legislativamente. Actualmente, a nivel nacional en materia de ruidos se dispone de la Ley 37/2003 del Ruido y sus desarrollos, no obstante su aplicación se enfoca al medio terrestre, requiriendo de un establecimiento formal para el control real de la contaminación acústica marina. Por tanto, no existe en nuestro país ninguna norma legal que determine las actividades marinas sujetas a evaluación ni umbrales cuantitativos de ruido subacuático como criterios de evaluación de impactos[1].

A pesar de todo, en los últimos años la Administración está exigiendo a determinadas actividades marinas la realización de Estudios de Impacto Acústico Submarino a través de modelizaciones para establecer los niveles de presión sonora a diferentes distancias con tal de poder determinar áreas de protección y actuación.

A falta tanto de legislación concreta como de procedimientos o metodología estandarizada, los consultores a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico pueden respaldarse tanto en el Documento Técnico realizado en el 2012 por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)[2] como en el Informe Específico del 2015 del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)[1]. Otras herramientas legislativas a tener en cuenta en materia de contaminación acústica marina son la Ley 41/2010 de Protección del Medio Marino, la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad y la Ley 9/2006 de Evaluación de Impacto Ambiental. Además, a nivel internacional, este tipo de contaminación se encuentra contemplada en diversos instrumentos normativos y resoluciones procedentes de diferentes instituciones, así como en convenios de gestión y conservación del medio marino (OSPAR[3], ACCOBAMS[4], ASCOBANS[5], CBI[6], etc.)

**Actividades Sujetas a Estudios de Impacto Acústico Submarino:**

No existe un listado oficial que determine aquellas actividades sujetas a Estudios de Impacto Acústico, sin embargo en el Documento Técnico del MAGRAMA[2] clasifican distintas actividades generadoras de contaminación acústica marina, donde se recomienda la implantación de medidas de mitigación y, consecuentemente susceptibles a quedar sometidas a procedimientos de evaluación de impacto acústico. Dichas actividades se resumen a continuación:

- Sónares y detonaciones militares: Ejercicios navales y sónares militares tácticos (principalmente el sónar activo de frecuencias bajas, medias y alta intensidad)
- Exploración y explotación de hidrocarburos: Engloban las campañas sísmicas para el conocimiento de las estructuras geológicas del subsuelo marino (exploración), la perforación del fondo marino, instalación de la estructura de explotación y su desmantelamiento.
- Construcciones: anclado de pilotes para diversas infraestructuras (aerogeneradores, pantalanes, etc.), dragados, explosiones (para romper sustratos, desinstalación de plataformas, etc.) y funcionamiento de parques eólicos marinos.
- Tráfico marítimo fundamentalmente de grandes buques
- Dispositivos de evitación acústica: instrumentos acústicos que alertan o ahuyentan con sonidos a animales marinos con tal de que eviten las artes de pesca o jaulas de maricultura.
- Investigación: las actividades de investigación que incluyen el uso de instrumentos acústicos incluso de alta intensidad (seguimiento de equipos, localización, etc.)

**Objetivo de esta comunicación:**

A lo largo de este artículo se presenta una revisión de los aspectos más relevantes que deben incluirse o tratarse a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico Submarino.

## OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO SUBMARINOS:

Los Estudios de Impacto Acústico tratan de conocer los niveles de presión e intensidad con el fin de determinar su posible afección. De manera que a partir de los resultados de una modelización permitan calcular el valor de indicadores concretos (como $SPL_{RMS}$, $SPL_{o-p}$ o SEL), cuya superación puede relacionarse con determinados umbrales de afección. No obstante, a la hora de establecer los criterios de evaluación se precisará adaptar las variables y umbrales según cada tipo de fuente (impulsiva, impulsiva repetida o continua)[1].

En general, estos estudios surgen para dar respuesta a requisitos administrativos ya que el MAGRAMA puede exigir que se incluya en los EsIA, una modelización acústica para estimar el impacto del ruido sobre mamíferos marinos y otras especies (especies de interés comercial, tortugas, etc.). Solicitando que se "*calculen los niveles de presión sonora a diferentes distancias con tal de permitir realizar una predicción de la extensión superficial de los potenciales impactos*", y/o presentando los resultados de determinados indicadores ($SPL_{o-p}$, $SPL_{RMS}$, SEL, $SEL_{24h}$, etc.). Solicitando en todos los casos la justificación de las fuentes de ruido consideradas, descripción tanto de los niveles de presión sonora utilizados como de las especies marinas bajo estudio, características y premisas realizadas para ejecutar el modelo, rangos de afección, resultados y conclusiones (contenidos mínimos de los estudios)

Concretamente, una de las aplicaciones para el MAGRAMA de los criterios de evaluación es la de identificar zonas de exclusión y de seguridad, determinando las áreas donde los umbrales son sobrepasados. En estas zonas y en función de la actividad, se proponen medidas de mitigación tales como las propuestas en el Documento Técnico[2].

Por tanto para realizar cualquier Estudio de Impacto Acústico Submarino el consultor, por un lado, deberá seleccionar, describir y justificar la metodología de los cálculos (modelo), así como establecer los índices o parámetros adecuados para determinar los umbrales de afección según especies y actividad. Y por el otro, resolver las condiciones iniciales, es decir conocer además de parámetros oceanográficos y batimétricos, la caracterización acústica de la emisión (actividad a implantar), del ruido ambiente, la presencia de receptores, etc.

## 3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RUIDO APLICABLES A ESTUDIOS DE IMPACTO ACÚSTICO

Existen numerosos modelos disponibles[1,7] para predecir la propagación acústica en el medio marino. Cada uno de ellos posee sus propias ventajas e inconvenientes respecto a los datos de entrada y los métodos de cálculo, pero todos dependen de la descripción del perfil de velocidad del sonido en la columna de agua y los parámetros que caracterizan la emisión inicial. Por ello, previa a la descripción de las diferentes alternativas de modelos de cálculo de la propagación, se exponen los inconvenientes generados por la falta de información con la que el consultor deberá enfrentarse a la hora de efectuar el Estudio de Impacto Acústico Submarino, y que afectará a los resultados de cualquier modelo:

Velocidad del sonido.

La velocidad del sonido se establecer a través de los perfiles de temperatura y salinidad en la columna de agua en el área de estudio pero habitualmente en España no se toman estos perfiles durante el EIA, por lo que el consultor debe buscar otras fuentes de información. Existen bases de datos oceanográficos públicas (*mapserver* del IEO, *National Oceanographic Data Center* del NOAA, etc.), sin embargo esta información se restringe a determinados meses, años y/o puntos (ver figura 1). Y aunque durante el periodo de la actividad a evaluar las condiciones oceanográficas variarán en cada punto o de un día para otro, debido a la calidad y cantidad de los datos al que el consultor puede acceder, a la hora de determinar la velocidad del sonido precisará considerar que las condiciones oceanográficas mantienen un único patrón estacional a lo largo de grandes áreas; empleándose, generalmente, un promedio de los datos

extraídos de los perfiles disponibles. Esta falta de datos de entrada de los modelos repercute en la estimación de la velocidad del sonido, consecuentemente en los cálculos de su propagación y cualquier otro resultado.

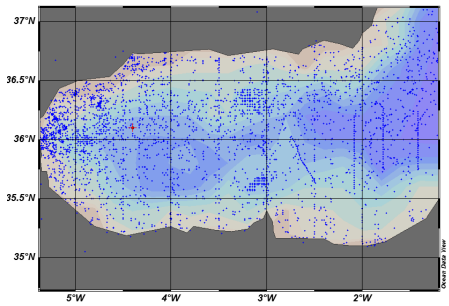



Figura 1. Puntos con perfiles de temperatura y salinidad de las campañas oceanográficas realizadas desde 1987 en el Mar de Alborán (NOAA, www.nodc.noaa.gov)

Emisión inicial (condiciones de frontera).

Para aquellas actividades cuya emisión acústica es controlada, tales como airguns (geosísmica marina) o sónares, se puede acceder a una descripción detallada: niveles de potencia de emisión y forma de la onda (espectros direccionales en planta y en alzado).

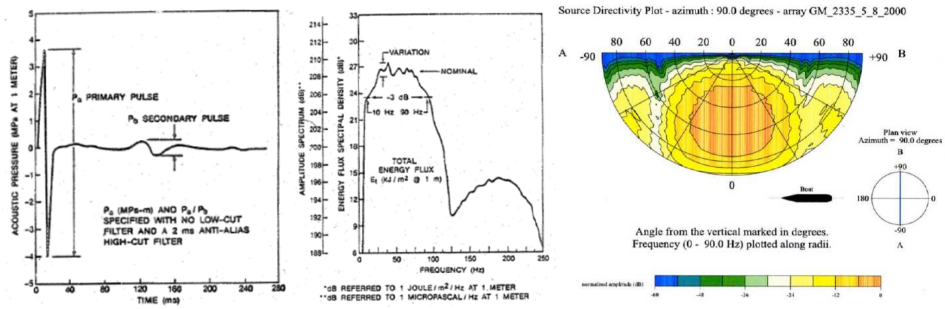



Figura 2. Ejemplo de la información aportada de emisión de una geosísmica marina: Izqda. presión acústica instantánea en función del tiempo; Centro: densidad espectral del flujo de energía; Dcha. espectro direccional en alzado (Fte. CEDEX[1]).

Sin embargo, para otro tipo de actividades generadoras de ruido que emplean conjuntos de maquinaria y presentan diferentes fases de trabajos, como pueden ser las perforaciones del suelo marino, la explotación de hidrocarburos, etc., prácticamente no se dispone de información de dichas emisiones acústicas. Ello es debido ya sea a la falta de datos, o a la privacidad a la hora de compartir determinada información o a restricciones propias de los ensayos de los trabajos en el mar; limitándose los datos a escasas recopilaciones bibliográficas que ofrecen valores de niveles globales genéricos.

| | Niveles de ruido en la fuente (dB re 1µPa/m) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Frecuencias centrales | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 |
| *Kulluck* - Barco de Perforación | 174 | 172 | 176 | 176 | 168 | - |
| *Kioriak* - Barco de apoyo | 162 | 174 | 170 | 166 | 164 | 159 |

Tabla 1. Ejemplo de la información disponible de actividades de barcos perforadores (Richardson 1995[8])

**Modelos de Propagación del Sonido.**

Existe una amplísima colección de modelos de propagación que a grandes rasgos se pueden clasificar según métodos físicos y métodos matemáticos.

Los modelos físicos (generalmente denominados modelos de flujo de energía) se enfocan en la variación de la intensidad del sonido; manteniendo el principio de la conservación de la energía, determinan la propagación del sonido considerando los diferentes factores de pérdidas energéticas (divergencia, absorción, etc.) y las repercusiones como consecuencia de las variaciones en la velocidad del sonido y la Ley de Snell.

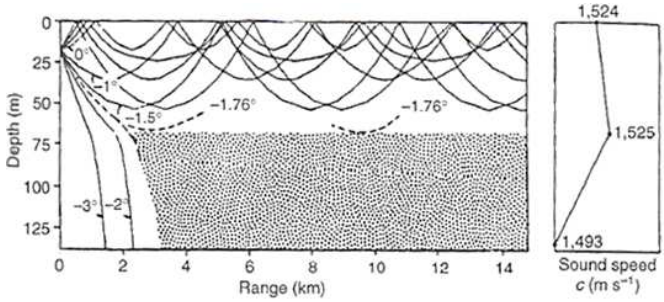



Figura 3. Ejemplo método físico. Diagrama de líneas de una fuente sonora localizada a una profundidad de 16 m. Propagación del sonido según el perfil de velocidad del sonido mostrado a la derecha (Etter[7]).

Los modelos matemáticos se fundamentan en la resolución de la ecuación de onda, siendo preciso el empleo de métodos numéricos. Resolver la ecuación para todo el rango de variación de las variables es imposible, por tanto, en función de la técnica de resolución empleada el modelo será aplicable a un determinado conjunto de problemas. A modo de resumen se presentan estos modelos que, a su vez, pueden clasificarse según la técnica utilizada (ver figura 4)

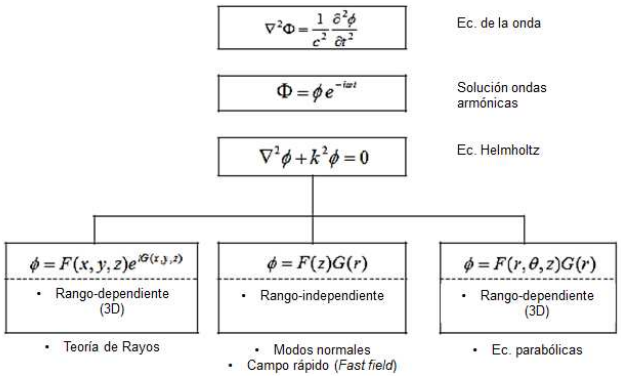



Figura 4. Resumen de las aproximaciones teóricas para la modelización de la propagación a través de modelos matemáticos (Etter[7]).

Como se ha comentado, existe una gran colección de modelos con sus limitaciones, adaptaciones y recomendaciones con lo que en función del estudio a realizar serán más apropiados unos que otros. El Informe Específico[1] del CEDEX resumen los criterios de aplicabilidad de los modelos tal y como se muestra en la tabla 2:

| | DOMINIO DE APLICABILIDAD | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Aguas someras (< 200 m) | | | | Aguas profundas (> 200 m) | | | |
| | Frecuencias bajas (< 500 Hz) | | Frecuencias altas (> 500 Hz) | | Frecuencias bajas (< 500 Hz) | | Frecuencias altas (> 500 Hz) | |
| Tipo de modelo | Indep. de $r$ | Dep. de $r$ | Indep. de $r$ | Dep. de $r$ | Indep. de $r$ | Dep. de $r$ | Indep. de $r$ | Dep. de $r$ |
| Rayos | - | - | + | ++ | + | + | ++ | ++ |
| Modos normales | ++ | + | ++ | + | ++ | + | + | - |
| Campo rápido | ++ | + | ++ | + | ++ | + | + | + |
| Parabólicos | + | ++ | - | - | + | ++ | + | + |

"++": el modelo es tanto aplicable (hipótesis aceptables) como práctico (coste computacional razonable).
"+": el modelo falla en uno de los dos aspectos anteriores.
"-": el modelo no es ni aplicable ni práctico.

Tabla 2. Resumen de la aplicabilidad de las distintas clases de modelos a los estudios de impacto ambiental[1,7]

Aplicación de un determinado modelo de propagación del sonido para un Estudio de Impacto Acústico Submarino.

En nuestro caso, el modelo de diseño propio empleado en varios Estudios de Impacto Acústico, concretamente para determinar la afección acústica de trabajos geosísmicos, se catalogaría dentro de métodos físicos o de flujo de energía. Los elementos que se incorporan en los cálculos e intervienen en la propagación son:

- La velocidad del sonido: determinada en función de las curvas de temperatura y salinidad.
- Modificaciones debido a las refracciones continuas de la onda sonora causadas por la variación de la velocidad y la Ley de Snell.
- Pérdidas por divergencia geométrica.
- Factores de atenuación y absorción en el desplazamiento de la onda.
- Efectos de reflexión y refracción en superficie y fondo marino, así como la interacción entre las diferentes señales (señal directa, indirecta y aportación de otros emisores)

A grandes rasgos, la forma inicial de la onda la establece el punto de partida de emisión, direccionalidad y distribución frecuencial de la intensidad. El frente de ondas se desplaza según el ángulo en el que incide, de manera que la propagación de la onda se modifica conforme los ángulos que adopta. El modelo calcula la variación de la forma del frente de ondas según su propagación tanto en profundidad como conforme se aleja en el plano horizontal. Según sea el perfil de velocidades la emisión puede variar de una propagación esférica a una casi cilíndrica (ver figura 7). La evolución del frente de ondas se calcula a través de un proceso iterativo de cálculo numérico: dado un transecto (plano r-z) se calcula para un intervalo de ángulo inicial ($\Delta\theta$) comprendido entre $\theta_1$ y $\theta_2$, la evolución del arco ($\Delta s$). Esta evolución se obtiene para pequeños incrementos de la profundidad ($\Delta z$) suficientemente pequeños como para considerar, en estos tramos, el gradiente de velocidad constante, lo que permite calcular la pérdida por divergencia geométrica.

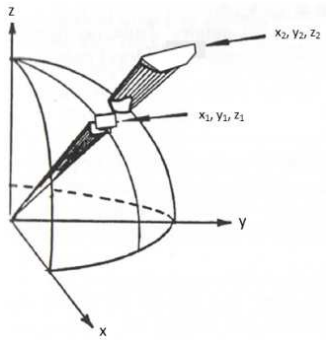



Figura 5. Esquema de la propagación del frente de ondas.

Como se ha comentado, durante los estudios acústicos el consultor no dispone de una completa información para la realización de los cálculos de la propagación del sonido, con lo

que en todo momento se emplea el valor mayorado para estar del lado de la seguridad (punto de vista más conservador). De manera que por ejemplo, en caso de no conocer el periodo de ejecución de la actividad o de datos actualizados, se seleccionan los parámetros oceanográficos que propicien una propagación favorable, o al no tener la caracterización de la fuente, se reemplazan los datos por la de otro sistema parecido cuya potencia de emisión no sea inferior.

## 4. RUIDO AMBIENTE

A pesar que la contribución del ruido ambiente no siempre es relevante en los niveles de presión sonora finales, la descripción del ruido ambiente del área de estudio suele ser un requisito especificado en las exigencias Administrativas para integrarlo dentro de los cálculos.

En la Directiva 2008/56/CE establece como una de las prioridades el determinar para cada región o subregión marina un conjunto de características correspondientes a un buen estado ambiental, entre las que se encuentra el Descriptor 11 (Ruido). Para su evaluación proponen indicadores de presión medidos de manera que representen las situaciones promedios anuales. Por tanto, aunque se han activado diversos proyectos que darán respuesta a esta necesidad, uno de los mayores inconvenientes a la hora de asignar o estimar el ruido de fondo presente en las áreas de estudio es que son pocos los estudios de ruido ambiente marino realizados en nuestras aguas, siendo necesario considerar la aportación del ruido de fondo al área teóricamente.

Desde un punto de vista teórico, las curvas de Wenz[9] son utilizadas como modelos predictivos para los niveles de ruido de fuentes no identificables y, por tanto, en los niveles de ruido de fondo. No obstante, existen otras publicaciones recientes con medidas de largas series temporales como es la de Castellote[10] donde describe las medidas de ruido de fondo realizadas en tres zonas de la costa española.

Por otro lado, aunque no se hace referencia en ninguno de los documentos oficiales[1,2], se debería considerar que la afección del sonido sobre una determinada área repercutirá en mayor o menor grado en función del estado de ruido ambiental (calidad acústica) del área. Es decir, es de esperar que la afección de la emisión de una actividad varíe en función del ambiente sonoro del área (por ejemplo el Estrecho de Gibraltar o cerca de las Islas Columbretes los escenarios acústicos son completamente diferentes[10]).

## 5. UMBRALES DE RUIDO PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Actualmente no existen conclusiones definitivas sobre la métrica más adecuada para expresar los diferentes efectos sobre cada grupo de especies, cuan menos sobre los umbrales de ruido correspondientes. Con lo que el consultor debe establecer los criterios de impacto acústico a través de una revisión bibliográfica, determinando los parámetros y/o rangos cuantificables de afección. Concretamente, en ambos documentos oficiales[1,2] se presentan recopilaciones de parámetros, umbrales y funciones de ponderación que pueden ser adoptados.

No obstante, no se especifica el intervalo de tiempo por el que hay que dividir o promediar la energía de una señal o ciclo para calcular los parámetros (ya sea el valor RMS o niveles de exposición), generando con ello confusión a la hora de aplicar estos criterios. La amplitud, duración, frecuencia y evolución temporal de la exposición al ruido influyen en la evaluación de los efectos y en concreto al establecer en el grado de TS (Threshold shift o “umbral de daño”) [1]

En este aspecto, en 2013 NMFS[11] publicó un borrador exponiendo nuevas propuestas para las evaluaciones de efectos TS sobre los mamíferos marinos, estableciendo un doble criterio: un

umbral para la presión de pico ($SPL_{0\text{-}p}$) y otro para la energía acumulada ($SEL_{cum}$) según si trata de ruido impulsivo o no impulsivo; planteando además, funciones de ponderación calculadas con el $SEL_{cum}$. Por ello, en la recopilación realizada por el CEDEX[1] se incluye este nuevo enfoque proponiendo para la determinación de la zona de exclusión, la aplicación de estos umbrales de presión de pico y exposición, en vez de los presentados en el Documento del MAGRAMA[2] para la densidad de potencia equivalente o la presión RMS.

Ante estas incertidumbres para establecer los criterios de evaluación el consultor debe mantener el principio de conservación, debiendo proporcionar un margen de seguridad adicional.

## 6. CONCLUSIONES

Es indiscutible la importancia de realizar Estudios de Impacto Acústico Submarinos con tal de poder gestionar los posibles impactos acústicos procurando minimizar sus efectos.

Considerando que se selecciona adecuadamente la metodología y se ejecutan correctamente los cálculos para la modelización de la propagación, todavía queda pendiente, a la hora de realizar un Estudio de Impacto Acústico Submarino determinar umbrales apropiados según especies, identificar la calidad acústica de las áreas o ruido ambiente, entre otros. Por ello y dado que normalmente la calidad de la información con la que se parte es escasa, se recalca la necesidad de enfocar los esfuerzos en avanzar, especificar y aportar datos e información relevantes a la hora de realizar cualquier modelización de la propagación del sonido.

Todo ello no invalida los trabajos realizados hasta la fecha ya que desde el punto de vista de gestión de la contaminación acústica y conservación del medio marino, en general las evaluaciones efectuadas presentan escenarios acústicamente más desfavorables que los esperados ya que los estudios han mantenido el principio de conservación, empleando criterios acústicamente más desfavorables y/o valores mayorados para estar del lado de la seguridad.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Mayo 2015. Informe Específico del Estado Actual del Conocimiento sobre Fuentes, Efectos y Modelos de Propagación del Ruido Subacuático Generado por los Trabajos de Geosísmica Marina en relación con los Procedimientos de Evaluación Ambiental (A6-T1-CA-3). 173 pp.
2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012). Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina. Madrid. 146 pp.
3. Convenio OSPAR para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste.
4. Acuerdo ACCOBAMS sobre la conservación de los cetáceos del mar Negro, el mar Mediterráneo y el Área Atlántica Vecina.
5. Acuerdo ASCOBANS para la conservación de los pequeños cetáceos del mar Báltico, el Nordeste Atlántico, el mar de Irlanda y el mar del Norte.
6. CBI: Comisión Ballenera Internacional.
7. Etter, P.C. 2013. “Underwater acoustic modeling and simulation”.
8. Richardson, W.J., Greene, C.R., Malme C.I., y Thompson D.H. 1995. “Marine mammals and noise”. Academic Press, San Diego.
9. Wenz, G.M. 1962. “Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources” Journal of the Acoustic Society of America 34: 1936- 1956.
10.Castellote M (2010) Patrón migratorio, identidad poblacional e impacto del ruido en la comunicación del rorcual común (Balaenoptera physalus L. 1758) en el Mar Mediterráneo Occidental. 250 p.
11.(2013) NMFS “Draft Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammals. Acoustic Threshold Levels for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# CARACTERIZACIÓN Y PATRONES DE EVOLUCIÓN DEL RUIDO MEDIOAMBIENTAL SUBMARINO EN UN ENTORNO DE AGUAS POCO PROFUNDAS EN EL MAR MEDITERRÁNEO

PACS: 43.30.Xm

Sánchez García, Antonio[1]; Rodrigo Saura, Francisco Javier[1]
[1]Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES)
Carretera de la Algameca s/n, 30205, Cartagena, España
Telf: 968 508 214
Fax: 968 507 713
Email: a.sanchez@electronica-submarina.com; f.rodrigo@electronica-submrarina.com

**ABSTRACT**

The increasing human activity in the marine environment is entailing a continuous growth in its acoustic ambient noise levels, which affects to the marine fauna wellbeing, sometimes in a severe way. On the other hand, the acoustic science includes a wide range of parameters to quantify the acoustic measurements taking place in the marine areas, which, depending on the analysis to be performed, provide information related with the source, the medium or the data collected by the measurement system. On this basis, this study presents an analysis and selection of parameters, such as OTO, SEL and SPL, which are used to analyze the daily and seasonal variation patterns of the ambient noise during a period of roughly a year, particularly with relation to the guidelines stablished in the Descriptor 11 of the Maritime Strategy Framework Directive. Measurements have been collected in the Mediterranean Sea, in the coast of the Region of Murcia.

**RESUMEN**

La creciente actividad humana en el medio marino está generando un continuo incremento en el nivel de ruido acústico ambiente en este entorno, el cual afecta al bienestar de la fauna marina, en ocasiones de forma severa. Por otro lado, la ciencia acústica incluye un amplio rango de parámetros para cuantificar las medidas acústicas que se llevan a cabo en las áreas marinas, los cuales, dependiendo del análisis a ser realizado, proporcionan información relacionada con la fuente, el medio o los datos captados en el equipo de medidas. Sobre esta base, este estudio presenta un análisis y selección de parámetros, como OTO, NES y NPS, que son utilizados para analizar los patrones diarios y estacionales de variación de ruido ambiente durante un periodo de tiempo de aproximadamente un año, en particular con relación a las directrices establecidas en el Descriptor 11 de la Directiva Marco de Estrategia Marina. Las medidas han sido tomadas en el Mar Mediterráneo, en las costas de la Región de Murcia.

## INTRODUCCIÓN

El continuo incremento de la actividad humana está conllevando un creciente impacto sobre el medio marino, afectando en particular a la vida marina, tanto a su flora como a su fauna. Entre las actividades con potencial incidencia en el bienestar de la fauna marina se encuentran las relacionadas con la generación de ruido acústico. Diferentes estudios confirman el efecto de esta clase de contaminación en distintas especies marinas [1] y especialmente sobre los mamíferos marinos [2,3], con consecuencias en ocasiones severas [4].

En paralelo a este incremento de la contaminación acústica y con el objetivo de mitigar su impacto, las naciones están desarrollando normativas para controlar las emisiones acústicas en el medio marino. En Europa destaca la Directiva Marco de Estrategia Marina (DMEM), dirigida a la preservación del entorno marino sobre la base de alcanzar el denominado Buen Estado Ambiental (BEA) de las aguas marinas de la UE para el año 2020.

Para evaluar el grado de consecución del BEA, la Directiva establece un total de once descriptores cualitativos, entre los que se encuentra uno (el número 11) referido específicamente a la introducción de energía, incluyendo el ruido submarino, en el entorno marino, para el que se han definido dos indicadores correspondientes a sonidos impulsivos y continuos de baja frecuencia para su seguimiento.

Adicionalmente, diversas organizaciones han comenzado a trabajar en estándares y metodologías para regular las emisiones de ruido submarino así como su medida. En este ámbito, en la actualidad existe un amplio rango de trabajos relacionados con la estandarización de la terminología acústica, cantidades y metodología para describir y medir ruido submarino [5-12], los cuales están contribuyendo de forma sustancial a la creación de un marco común en el ámbito de la UE en el campo de la acústica submarina.

Sobre la base de lo mencionado anteriormente, el presente artículo tiene como objetivos la aplicación de las definiciones de parámetros acústicos referidas previamente a un conjunto de medidas acústicas de buques de superficie y ruido ambiente, con el fin de incrementar la concienciación sobre su uso, dominio de aplicabilidad y explotación de la información proporcionada, así como el análisis de la evolución de los niveles de ruido ambiente en un área marina especialmente ruidosa en el entorno de un puerto comercial y centrado tanto en ruidos impulsivos como continuos de baja frecuencia.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: En la siguiente sección se describen el área de operación, las características del equipo empleado para capturar los datos acústicos y el conjunto de datos registrados. A continuación se presenta una sección específica relativa a los indicadores acústicos seleccionados para caracterizar las señales acústicas y el resultado de sus análisis. La siguiente sección se centra en los patrones de evolución diarios y estacionales del ruido ambiente en el área analizada. Por último, el artículo finaliza con las conclusiones del estudio.

## COLECCION DE DATOS ACÚSTICOS

El área de operaciones donde se ha desplegado el equipo de medidas corresponde a la costa de la Región de Murcia, en concreto a una zona próxima a un puerto comercial, que se caracteriza por elevados niveles de ruido debido a la actividad humana, en especial trabajos en el área portuaria y tráfico marítimo. Esta intensa actividad hace que tenga un importante valor el análisis de medio y largo plazo, mediante un conjunto de parámetros acústicos seleccionados, de los niveles de ruido acústico, como base para estudiar su evolución y sus potenciales impactos en la fauna marina.

Las medidas han sido obtenidas mediante el sistema MIRS fabricado por SAES (Fig. 1), con capacidad de registro y análisis de datos submarinos multi-influencia: acústicos, eléctricos,

magnéticos de presión y sísmicos. MIRS incorpora entre sus sensores un hidrófono omnidireccional calibrado.

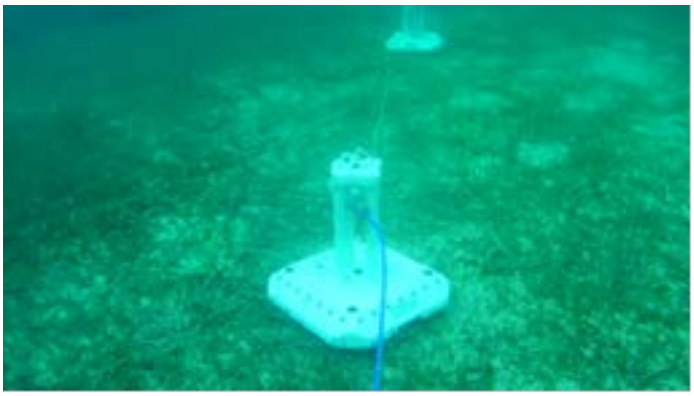


Fig. 1. Unidades submarinas del Sistema de Medidas Multi-Influencia MIRS

Las medidas se han llevado a cabo durante un periodo de cerca de un año, entre Septiembre de 2013 y Julio de 2014. Para la realización de este estudio se han utilizado un subconjunto de 1000 medidas correspondientes a buques mercantes y ruido ambiente.

## ANALISIS DE INDICADORES ACÚSTICOS

El análisis se ha llevado a cabo sobre un conjunto de indicadores o parámetros acústicos definidos en [5] y [12] a partir de dos conjuntos de datos de medidas correspondientes a buques y ruido ambiente. Estos indicadores corresponden a: Nivel de Presión Sonora (NPS), Raíz Cuadrática Media del Nivel de Presión Sonora (RCM NPS), Nivel de Exposición Sonora (NES), Nivel de Presión sonora Pico-a-Pico ($P_{p-p}$), Nivel de Presión Sonora de Pico (o Nivel de Presión Sonora Cero-a-Pico) ($P_{0-p}$) y tercios de octava (OTO) de 12.5 Hz a 6350 Hz.

Cada indicador ha sido calculado para las medidas completas y excepto en el caso del RCM NPS en intervalos de 30 segundos, cuando la medida supera esta duración, y obtenido el valor medio y máximo para el conjunto de intervalos.

En Fig.2 se muestran gráficamente los resultados para un subconjunto de estos parámetros obtenidos a partir de los registros completos de buques y ruido ambiente: NES, RCM NPS y $P_{p-p}$.

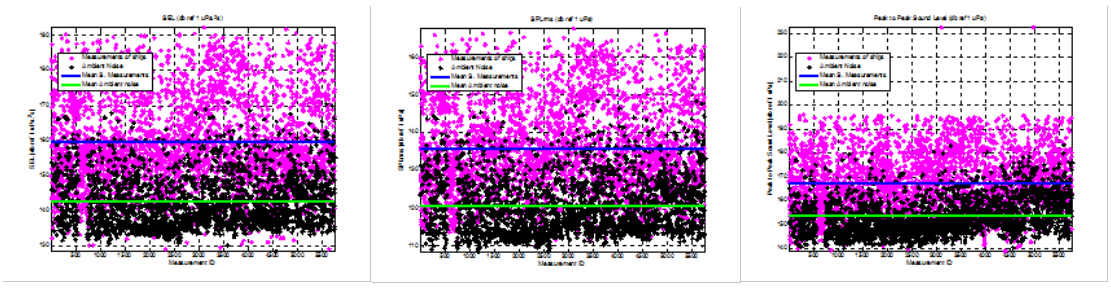


Fig. 2. Resultados de los parámetros NES (izqda), RCM NPS (medio) y $P_{p-p}$ para registros completos de buques y ruido ambiente (dcha).

Los valores globales obtenidos para los diferentes parámetros se muestran resumidos en la Tabla I.

| | Medidas completas | | Máximos 30 s | | Media 30 s | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Buques** | **Ambiente** | **Buques** | **Ambiente** | **Buques** | **Ambiente** |
| **NES (dB ref 1 μPa$^2$ s)** | 159.4 | 142.6 | 156.6 | 137.6 | 150.8 | 135.5 |
| **RCM NPS (dB ref 1 μPa)** | 135.8 | 120.7 | 162.3 | 148.2 | 150.7 | 141.8 |
| **$P_{p-p}$ (dB ref 1 μPa)** | 167.6 | 153.6 | 167.4 | 153 | 159.1 | 148.2 |
| **$P_{0-p}$ (dB ref 1 μPa)** | 162.5 | 148.7 | 162.3 | 148.2 | 154 | 143.2 |

Tabla I. Resumen de los valores obtenidos para los diferentes parámetros acústicos analizados en el estudio

Del análisis de estos resultados se observa que, como es esperable, los valores más bajos corresponden a los valores medios de los parámetros; el valor más alto de NES corresponde a los registros de medida completos; el valor más alto de NPS corresponde al valor de pico-a-pico y en todos los casos, los valores medidos para los buques son mayores que los medidos de ruido ambiente.

En Fig. 3 se presentan los tercios de octava en los que se obtiene el máximo nivel en cada medida y su distribución.

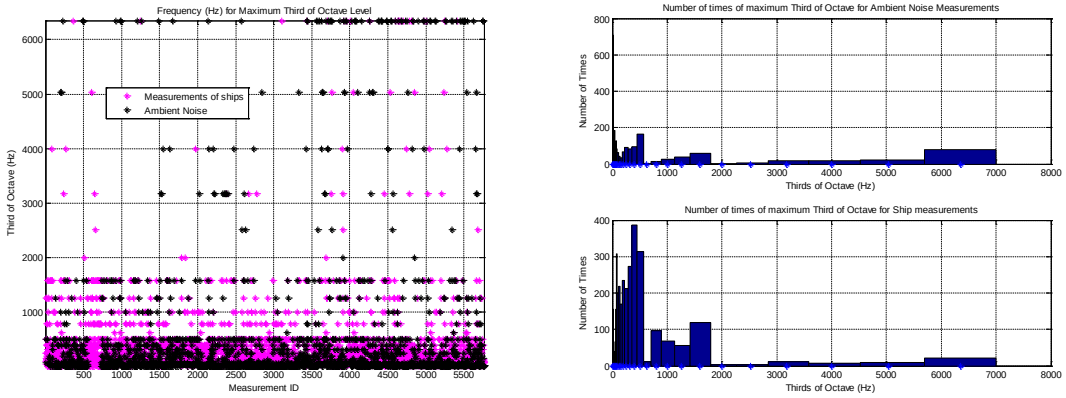



Fig. 3. Tercios de octava de máximo nivel para el conjunto de medidas (izqda) y su distribución (dcha)

Del análisis de estos resultados se deduce que la banda 12,5 – 500 Hz concentra el mayor nivel de energía dentro del rango de frecuencias evaluado. Para medidas de ruido ambiente, el tercio de octava de mayor nivel es el de 12.5 Hz, mientras que para medidas de buques es el de 394 Hz. También es de resaltar el alto nivel de energía existente en el tercio de octava de 6350 Hz

## PATRONES DE VARIACIÓN DIARIOS Y ESTACIONALES

Para adaptar el estudio a los requerimientos del Descriptor 11 de la DMEM, el análisis de los patrones de evolución diarios y estacionales de ruido ambiente se divide en ruidos impulsivos y ruidos continuos de baja frecuencia.

Para el estudio de los patrones diarios se han establecido subconjuntos de datos correspondientes a los intervalos temporales: 0-8 h (noche), 8-16 h (mañana) y 16-24 h (tarde). Para el estudio de los patrones estacionales se han creado subconjuntos de datos para cada mes del año, considerando que los datos de diciembre a febrero corresponden a invierno, de marzo a mayo a primavera, de junio a agosto a verano y de septiembre a diciembre a otoño. Existen registros de datos de todos los meses excepto de agosto y algunos intervalos diarios de septiembre, por lo que por razones de comparación los datos de este mes tampoco han sido tenidos en consideración en el estudio.

**Ruido impulsivo**

Con relación al ruido impulsivo, se han calculado los parámetros NES y NPS ya que se trata de las dos métricas principales para medir el efecto del ruido impulsivo en los mamíferos marinos. El parámetro NES integra toda la energía acústica contenida durante un evento o medida (NES acumulativo) teniendo en cuenta tanto su intensidad como su duración, mientras que el parámetro NPS puede ser considerado como una medida del nivel promedio no ponderado del sonido durante el periodo de medida.

El valor del parámetro NES acumulativo ha sido calculado tanto para los registros completos de ruido ambiente como para estos registros divididos en segmentos de 30 segundos, para los que se ha calculado el valor máximo y promedio. Los resultados de estos procesamientos se muestran en Fig.4 para el periodo de 12 meses y los tres intervalos temporales diarios analizados.

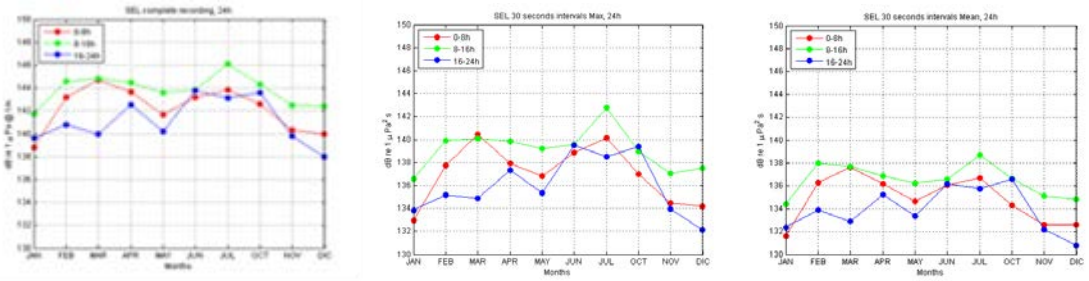



Fig. 4. Valores de NES de los registros completes (izqda) y máximo (centro) y medio (dcha) para los registros divididos en segmentos de 30 segundos de duración

Del análisis de los datos se deduce que los valores más altos de NES se obtienen durante la estación veraniega, coincidiendo con el periodo de mayor actividad en el área portuaria. El intervalo de tiempo con mayor NES corresponde al periodo matinal (8-16 h) y el de menor valor de NES al periodo vespertino (16-24 h).

Con relación al parámetro NPS, se ha calculado el valor RCM para los registros completos y los valores máximo y promedio del NPS pico-a-pico ($P_{p-p}$) para los registros divididos en intervalos de 30 segundos. Los resultados se muestran en Fig. 5.

Del análisis de estos datos se infiere que globalmente los valores más altos se obtienen en primavera y verano y en el intervalo temporal matinal (8-16 h). Se aprecia en el caso del parámetro $P_{p-p}$ que los valores promedio son bastante similares para las tres franjas horarias analizadas.

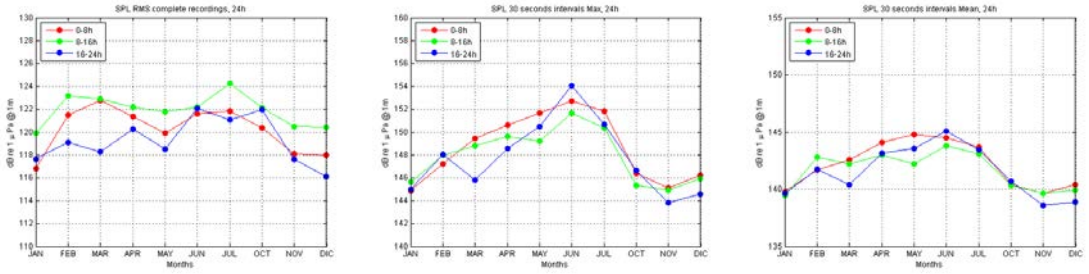



Fig. 5. Valores de RCM NPS de los registros completes (izqda) y máximo (centro) y medio (dcha) de Pp-p para los registros divididos en segmentos de 30 segundos de duración

Es de resaltar que el grupo de trabajo establecido por la CE para el desarrollo del Descriptor 11 (TSG Noise), en base a estudios recientes sobre perturbaciones sobre mamíferos marinos, ha propuesto un valor de NES = 140 dB re 1 $\mu Pa^2$ como umbral de perturbación significativa debida a múltiples sonidos explícitamente impulsivos, y un valor de NPS = 130 dB re 1 µPa como umbral para perturbación significativa del comportamiento debida a sonidos de tipo no pulsado de corta duración [13].

Para el parámetro NES se han obtenido valores promedio de 142.39 dB para los registros completos y de 135.12 dB para el caso de los registros divididos en intervalos de 30 segundos. Estos valores están próximos o exceden los límites recomendados por el TSG Noise.

Para el parámetro NPS se han obtenido valores promedio de 120.48 dB de valor RCM para los registros completos y de 141.8 dB para intervalos de 30 segundos de los registros en el caso de $P_{p\text{-}p}$, que exceden el límite recomendado por el TSG Noise.

Sobre la base de los altos niveles medidos para los indicadores NES y NPS, se puede concluir que el área bajo estudio puede ser catalogada como de riesgo potencial alto para los mamíferos marinos.

Con relación al ruido impulsivo, se ha llevado a cabo asimismo un estudio preliminar sobre la presencia de sonidos transitorios en el área bajo estudio, no habiéndose detectado una evidencia clara de la presencia de los mismos como se refleja en Fig.6, donde si puede ser observado un alto nivel de ruido a bajas frecuencias.

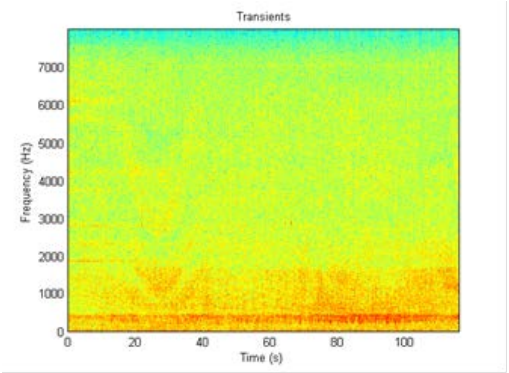



Fig. 6. Análisis de sonidos transitorios en el área bajo estudio

**Ruido continuo**

Con relación al ruido continuo y siguiendo las recomendaciones del Descriptor 11 de la DMEM se han calculado los valores correspondientes a los tercios de octava de 62.5 Hz y 125 Hz. Los valores promedio para el conjunto de casos estudiados se presentan en Fig. 7.

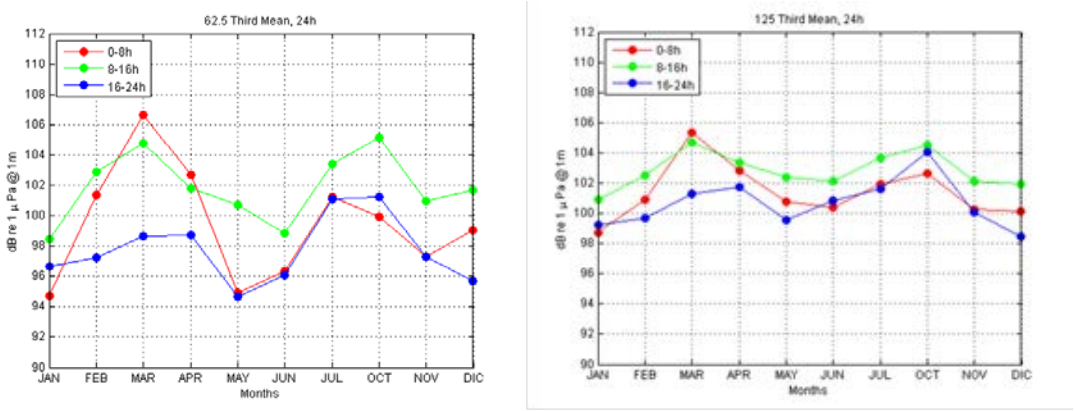



Figura 7. Valores promedio para los tercios de octava de 62.5 Hz y 125 Hz

Para los dos tercios de octava, los valores más altos se obtienen en primavera (en torno a marzo) y otoño (en torno a octubre). En el caso de los intervalos diarios, los mayores valores se obtienen durante el periodo matinal (8-16 h) y los valores más bajos durante el periodo vespertino (16-24 h).

Se obtienen valores promedio globales de 99.67 dB y 101.62 dB para los tercios de octava de 62.5 Hz y 125 Hz respectivamente. Si comparamos estos valores con los ampliamente referenciados en la literatura correspondientes a las curvas de ruido ambiente submarino de Urick [14] y Wenz [15], considerando condiciones ambientales iguales o peores a los valores promedio en la zona de medidas, concluimos que los niveles de ruido ambiente obtenidos son en promedio 20 dB más altos que los valores en [14] y 10 dB más altos que los valores en [15]. También es de resaltar que respecto a estas referencias, los valores para el tercio de octava de 125 Hz no decaen en relación a los valores de la octava de 62.5 Hz sino que se incrementan ligeramente.

Como consecuencia, los niveles medidos de ruido ambiente submarino son significativamente mayores que los reflejados en la literatura con el evidente potencial nocivo sobre la fauna marina.

**CONCLUSIONES**

El presente estudio incluye un análisis de la aplicación efectiva sobre señales acústicas de buques y de ruido ambiente de los parámetros o indicadores más ampliamente referenciados con relación a medidas en el ámbito submarino, los cuales permiten la caracterización de las medidas acústicas, mostrando una vía para analizar campañas de monitorización acústica. Los resultados del análisis muestran resultados coherentes con las características de las señales medidas. En particular, el análisis de los tercios de octava muestra que los mayores niveles de energía acústica se obtienen para el tercio de octava de 12.5 Hz en el caso de ruido ambiente y el tercio de octava de 397 Hz en el caso de buques.

Adicionalmente, se muestran los resultados del análisis de los patrones de evolución diarios y estacionales del ruido ambiente en un entorno de aguas poco profundas, con presencia de numerosas fuentes de ruido antropogénico por su proximidad a un entorno portuario. Siguiendo directrices de la DMEM el análisis se centra en la evolución de los niveles de ruido impulsivo y ruido continuo. Los resultados obtenidos en ambos casos son coherentes con el incremento de actividad en el entorno portuario, en particular durante el periodo veraniego y en el periodo matinal a lo largo del día (intervalo 08-16 h).

Del resultado de los análisis de los parámetros NES y NPS relacionado con ruidos de tipo impulsivo, que están cercanos o superan los umbrales de perturbación definidos por el TSG Noise (DMEM) para los mamíferos marinos, y de los niveles de ruido continuos medidos para los tercios de octava centrados en 62.5 y 125 Hz, que reflejan un incremento significativo con relación a los valores promedio referenciados en la literatura para estos intervalos de frecuencia, se concluye que los altos niveles obtenidos en todos los casos representan un riesgo claro de resultar nocivos sobre la fauna marina en el área de estudio

## REFERENCIAS


[1] Normandeau Associates, Inc., “Effects of Noise on Fish, Fisheries and Invertebrates in the U.S. Atlantic and Arctic from Energy Industry Sound-Generation Activities. A Workshop Report for the U.S. Dept. of the Interior. Bureau of Ocean Energy Management. Contract # M11PC00031. 72 pp. plus Appendices”, (2012)

[2] C.H Hastings. “Coming to terms with the effects of ocean noise on marine mammals”. Acoustics today, volume 4(2), pp. 22-34, (2008)

[3] W.J. Richardson, C.R. Green, C.I. Malme and D.H. Thomson. “Marine mammal and noise”, Academic Press, Inc., (1995)

[4] A. Fernández, J.F. Rodríguez, A. Espinosa de los Monteros, P. Herráez, P. Castro, J.R. Jaber, V. Martin and M. Arbeló. “’Gas and fat embolic syndrome’ involving a mass stranding of beaked whale (family Ziphidae) exposed to anthropogenic sonar signals”. Veterinary Pathology, volume (42), pp. 46-457, (2005)

[5] TNO-DV 2011 C235 Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part I: physical quantities and their units. September 2011.

[6] TNO-DV 2011 C251 Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing. September 2011

[7] European Marine Strategy Framework Directive Good Environmental Status (MSFD-GES). Report of the Technical Subgroup on Underwater Noise and other forms of energy. 27 February 2012.

[8] Technical Guidance on: Underwater Sound in Relation to Dredging. World Organization of Dredging Associations (WODA). June 2013.

[9] European Marine Strategy Framework Directive. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas. Part I. Executive summary and recommendations. MSFD Technical Subgroup on Underwater Noise. November 2013.

[10] European Marine Strategy Framework Directive. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas. Part II. Monitoring Guidance Specifications. MSFD Technical Subgroup on Underwater Noise November 2013.

[11] European Marine Strategy Framework Directive. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas. Part III. Background Information and Annexes. MSFD Technical Subgroup on Underwater Noise. November 2013.

[12] Good Practice Guide No. 133. Underwater Noise Measurement. National Physical Laboratory (NPL). (2014).

[13] R.P.A Dekeling, M.L. Tasker, A.J. Van der Graaf, M.A. Ainsle, M.H. Anderson, M. Andre, J.F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, J. Dalen, T. Folegot, R. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S.P. Robinson, P. Sigray, G. Sutton, F. Thomsen, S. Werner, D. Wittekind, J.V. Young. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part III: Background Information and Annexes. JRC Scientific and Policy Report EUR 26556 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014, doi: 10.2788/2808.

[14] R.J. Urick." Principles of Underwater Sound", 3rd Edition, McGraw-Hill, (1983)

[15] Wenz M. "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources". J. Acoust. Soc. Am, 34, pp. 1936-1956 (1962).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE DIRECTIVIDAD DE LOS TRANSDUCTORES DE LA ECOSONDA SIMRAD EK60

**REFERENCIA PACS: 43.30.+m**

Pilar Córdoba Selles[1], María del Carmen Clemente Medina[2], Magdalena Iglesias Marroig[1], Enrique Nava Baro[2], Joan Miquel Batle[1]

[1]Centro Oceanográfico de Baleares, Instituto Español de Oceanografía, Muelle de Poniente s/n, 07005 Palma de Mallorca.
[2]Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. ETSI de Telecomunicación.
Campus de Teatinos, Universidad de Málaga. 29071 Málaga (España).
Teléfono: +34 952131188 email: en@uma.es;

## ABSTRACT

The scientific echo sounder Simrad EK60 could be used for quantification of fisheries resources in marine science research campaigns. They use different frequency channels (from 18 to 200 KHz), emitted by underwater sound transducers with circular aperture geometries. Calibration is essential to obtain reliable values of $T_s$ (Target Strength) and $S_v$ (Volume Backscattering Coefficient) parameters, which are used to estimate fisheries stocks using echo volume integration. In this paper, manufacturer's calibration method is presented, together a new proposal for the acquisition and post-processing of calibration data to obtain more accurate results.

## RESUMEN

La ecosonda científica Simrad EK60 se utiliza para cuantificar los recursos pesqueros en campañas de investigación oceanográfica, utilizando diferentes canales de frecuencias (de 18 a 200KHz) mediante transductores acústicos de apertura con geometría circular. Su calibración resulta esencial para obtener los valores de $T_s$ ('target strength') y $S_v$ ('Volume backscattering coefficient'), necesarios para estimar los tamaños de los stocks de las pesquerías mediante integración de los ecos. En este trabajo se presenta el método de calibración propuesto por el fabricante, así como una nueva propuesta de obtención y postproceso de datos que permite obtener calibraciones fiables.

## INTRODUCCIÓN.

La gestión sostenible de los recursos pesqueros necesita de una correcta estimación de la biomasa marina. Para ello, muchas campañas de gestión o investigación pesquera utilizan ecosondas o sónares acústicos, ya que pueden obtener datos de forma eficiente de la columna de agua y evaluar la abundancia de pesca en ella, tal vez con la limitación de la zona más próxima al fondo marino, debido a que el eco sonoro del fondo dificulta su cuantificación. El procedimiento que se sigue consiste en recorrer sectores de la plataforma continental mientras se registra los ecos producidos por los cardúmenes de peces detectados por las ecosondas [Sim05]. El análisis de los ecogramas no permiten diferenciar claramente la especie predominante del cardumen, especialmente en lugares de gran biodiversidad biológica, como el Mediterráneo, por lo que se realizan pescas selectivas para obtener una muestra significativa que permita determinar las proporciones entre diferentes especies.

La calibración de los equipos acústicos utilizados es esencial para que la estimación de la biomasa pesquera sea fiable. Para ello, suele utilizarse un método de calibración con un patrón conocido que consiste en una esfera metálica que se coloca suspendida debajo de los transductores acústicos del buque y a una determinada profundidad, que debe ser suficiente para evitar los efectos del campo acústico cercano y no demasiado lejana para evitar interferencias durante la calibración. De forma simultánea, se realizan las mediciones necesarias para determinar la velocidad de propagación del sonido en el agua hasta la profundidad a la que se coloca la esfera metálica mediante el uso de un CTD.

## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION.

El procedimiento de calibración descrito en este trabajo fue realizado cerca de la bahía de Palma de Mallorca, el día 24 de Junio de 2015, a bordo del buque oceanográfico Miguel de Oliver, perteneciente a la Secretaría de Pesca del Gobierno de España, como paso previo a la realización de la campaña oceanográfica Medias 2015, cuyo propósito es evaluar los recursos pesqueros pelágicos en la plataforma continental española en el Mediterráneo. Todos los datos presentados en este trabajo provienen de dicha calibración.

El equipo acústico utilizado se compone del sistema de ecosonda cientifico Simrad EK60, que dispone de cinco transductores de tipo ‘split beam’ que pueden trabajar de forma simultánea a la frecuencia nominal de 18, 38, 70, 120 y 200 KHz. La ecosonda registra los ecogramas en tiempo real y los almacena en ficheros raw para su análisis posterior durante todo el intervalo de calibración.

Durante la calibración se obtienen medidas en las cercanías del eje acústico. La colocación en el mismo eje sería deseable pero difícilmente conseguible en la práctica debida a una serie de factores, tales como la variación de las corrientes marinas o el movimiento del barco, por lo que se obtiene una serie de mediciones del eco recibido en sus cercanías. Para simplificar el procedimiento de calibración, tanto el fabricante Simrad como el International Council for the Exploration of the Sea (ICES) [Simrad, Foo87, Dem15] recomiendan sujetar las esferas mediante tres hilos fijados a la cubierta del buque, de forma que pueda largarse hilo suficiente para colocar la esfera en el lugar deseado. Se utiliza hilo Dyneema por su elevada resistencia y tres servomotores para poder realizar la colocación de las esferas metálicas. En la Figura 1 se muestra una fotografía del buque oceanográfico Miguel de Oliver junto con dos proyecciones de su sección y cubierta en las que se muestra la posición y colocación de los servomotores y el montaje que sujeta las esferas metálicas utilizadas para la calibración acústica. En la Figura 2 se muestran las dos esferas utilizadas en este trabajo (cobre y tungsteno) con el contrapeso utilizado (Figura 2a) y el detalle de sujeción al hilo Dyneema de las esferas (2b y 2c).

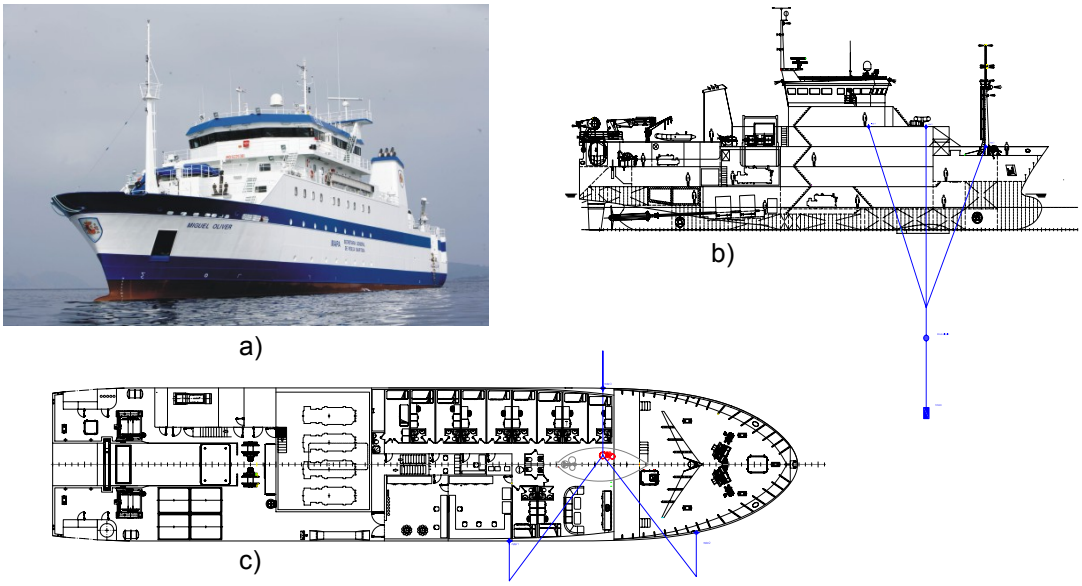


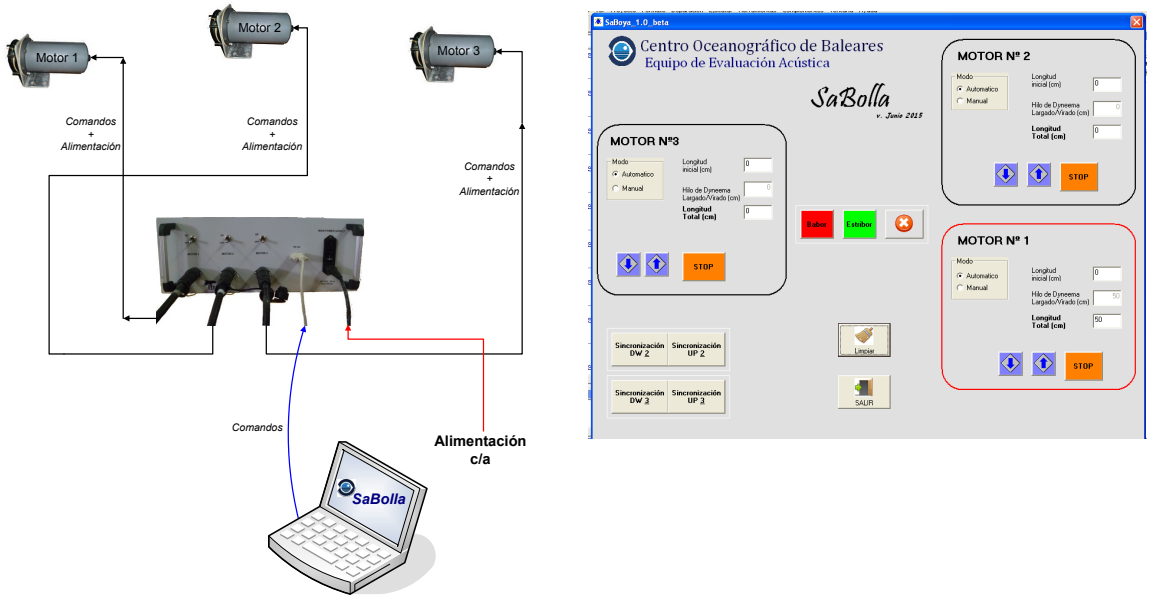

**Figura 1.** Esquema de montaje de la esfera metálica de calibración en el buque oceanográfico Miguel Oliver. a) Buque oceanográfico Miguel Oliver; b) Alzado del buque; c) Cubierta superior.




**Figura 2.** Esferas metálicas utilizadas para la calibración acústica de las ecosondas. a) Montaje de la esfera y su contrapeso; b) Esfera de Cobre; c) Esfera de Carburo de Tungsteno.

La colocación de la esfera en las proximidades del eje acústico es un procedimiento complejo que debe realizarse con gran cuidado y precisión, por lo que se ha utilizado el programa Sabolla, desarrollado de forma específica por el Centro Oceanográfico de Baleares del IEO para el control de los servomotores que permiten posicionar de forma efectiva la esfera metálica bajo el casco del buque.

En la Figura 3 se muestra el montaje realizado para realizar el control de manejo de los servomotores y el interfaz gráfico del programa Sabolla con los botones que permiten realizar el control de los mismos. Este programa ha sido desarrollado en VisualBasic para sistema operativo Windows y se utiliza de forma simultánea al registro de datos de la ecosonda mediante su software específico Echoview.




a) b)

**Figura 3.** Sistema de control de los servomotores que permiten la colocación de las esferas en el eje acústico. a) esquema de montaje, b) interfaz de control.

El transductor acústico funciona como una antena de apertura circular, que consiste en una cavidad resonante normalmente diseñada para operar a una frecuencia determinada y un ancho de banda dado, que emite y recibe señales acústicas con una potencia que depende del ángulo de incidencia, según su diagrama de directividad $D(\theta,\varphi)$

$$D(\theta,\varphi) = 2\left|\frac{J_1(ka\,sen\theta)}{ka\,sen\theta}\right|, \qquad (1)$$

donde $(\theta,\varphi)$ son las coordenadas esféricas, $J_1()$ es la función de Bessel de primera especie y orden 1, $k=2\pi/\lambda$ es el número de onda y a es el radio de la apertura. Es habitual utilizar para las ecosondas científicas un sistema de coordenadas $(\alpha,\beta)$ sobre el eje de referencia de la ecosonda, referido a los ángulos alongship y athwartship del buque, relacionado con las coordenadas esféricas mediante la expresión:

$$\vartheta = \tan^{-1}\sqrt{\tan^2\alpha + \tan^2\beta}\,, \quad \varphi = \tan^{-1}\frac{\tan\beta}{\tan\alpha},$$

En lugar de los conceptos de potencia de la fuente o índice de directividad, Simrad utiliza el término de ganancia, definida como la relación entre la intensidad observada en un punto lejano cuando se utiliza un transductor real y la intensidad de un transductor ideal omnidireccional sin pérdidas. Este concepto es muy útil en la práctica cuando se utiliza en conexión con las ecuaciones de Sonar o Radar. La ganancia está relacionada con la directividad mediante la expresión

$$G(\alpha,\beta) = \eta\, D(\alpha,\beta), \qquad (2)$$

Empleando este concepto, la potencia del eco de un objeto de pequeño tamaño, recibida en el transductor, será

$$P_r\ (W) = P_t\, G(\alpha,\beta)\frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}\sigma\frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}\frac{\lambda^2}{4\pi}G(\alpha,\beta), \qquad (3)$$

en la que cada factor se corresponde con un efecto fácilmente identificable [4]. Así, $P_t$ es la potencia ofrecida por el transductor, que es radiada en todas direcciones (con la ponderación de la ganancia G) y que se atenúa por divergencia del haz (según la ley del cuadrado de la distancia) y la atenuación del medio $\alpha$; una parte de esa potencia es reflejada por el blanco, según la superficie de dispersión equivalente $\sigma$ ('backscattering area'); el eco vuelve hacia el transductor con una atenuación similar al del trayecto de ida y es detectado en el área de recepción efectiva del transductor $\frac{\lambda^2}{4\pi}G$, donde $\lambda$ es la longitud de onda de la señal del eco.

El parámetro que caracteriza al blanco es el factor $\sigma$, que puede obtenerse mediante sustitución en la ecuación (3), en función de la potencia recibida, la distancia al blanco (ecuación también denominada TVG) y una constante que depende de parámetros del transductor y de la frecuencia utilizada. En dB:

$$\sigma(dB) = 10\log P_r + 40\log r + 20\alpha r - 10\log\frac{P_t G^2(\alpha,\beta)\lambda^2}{64\pi^3}$$

aunque el parámetro más utilizado es la llamada potencia del blanco $T_s$, que simplemente está relacionada con $\sigma$ mediante el cociente $T_s=\sigma/4\pi r_0^2$, donde $r_0$=1m es un valor de referencia.

La calibración debe determinar los parámetros relacionados con el transductor, siendo muy importante el valor de la ganancia máxima $G_0$ =G(0,0)

$$G_0(dB) = 5\log\frac{P_r}{T_s} + 20\log r + 10\alpha r - 5\log\frac{P_t\lambda^2}{16\pi^2}$$

que, de esta forma, puede obtenerse a partir de los datos de potencia recibida y distancia del eco registrados por la ecosonda. El valor de $T_s$ de una esfera metálica sólida puede determinarse mediante el procedimiento descrito originalmente por Faran en 1951, que realizó un estudio analítico de la dispersión del sonido producido por esferas o cilindros sólidos e isotrópicos rodeadas por un fluido, asumiendo que una onda plana monocromática incide sobre ellos y produce ondas de compresión y shear en la esfera que pueden tener un efecto muy significativo en la distribución angular del sonido reflejado [Far51]. Este procedimiento es el que se ha seguido en este trabajo, aunque en la práctica suelen utilizarse valores tabulados de $T_s$ , una vez determinada la velocidad de propagación del sonido mediante el uso de un CTD, ya que los radios y frecuencias normalmente empleadas por las ecosondas suelen estar alejados de las resonancias de la respuesta de dispersión de la esfera en las condiciones habituales de trabajo, por lo que los valores estimados son muy razonables. Por ejemplo, para la calibración efectuada el día 24 de Junio de 2015 en aguas próximas a Palma de Mallorca, con una velocidad de propagación del sonido en el agua a 15m de profundidad de c=1530.2 m/s, evaluada con los datos obtenidos por el CTD y considerada constante para el rango de distancias de interés (5-20 m de profundidad), los valores obtenidos de $T_s$ para la esfera de carburo de tungsteno empleada (diámetro de 38.1 mm, densidad 14900 Kg/m$^3$, velocidades del sonido en la esfera $c_{compresion}$=6853 m/s, $c_{shear}$=4171 m/s) son los que se muestran en la Tabla 1, empleando el método de Faran.

**Tabla 1.** Valores de Ts de la esfera metálica de Tungsteno (d=38.1mm)

| f (KHz) | 18 | 38 | 70 | 120 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| $T_s$ (dB) | -42.38 | -42.36 | -41.66 | -39.91 | -38.80 |

## POSTPROCESADO DE LOS DATOS

Los datos obtenidos en el proceso de calibración son registrados por el software de la ecosonda y almacenados en ficheros raw que contienen una colección de una variedad de datagramas registrados para su posterior análisis y la obtención de los parámetros de calibración de los transductores de la ecosonda. Para ello, se han empleado tres procedimientos diferentes:

1. Utilización del programa de calibración suministrado por el fabricante de la ecosonda. Este programa analiza los ficheros raw grabados y permite obtener un fichero texto con los parámetros de calibración de cada transductor utilizando dos modelos diferentes: uno polinómico, de orden no especificado, o el llamado "beam model", también polinómico, según la expresión:

$$G(\alpha,\beta) = G_0 + \left(\frac{\alpha-\alpha_0}{B_\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\beta-\beta_0}{B_\beta}\right)^2 + 0.18\left(\frac{\alpha-\alpha_0}{B_\alpha}\right)^2\left(\frac{\beta-\beta_0}{B_\beta}\right)^2, \quad (4)$$

2. Utilización del fichero texto obtenido por el programa anterior, que contiene los datos de $T_s$ de los datos del fichero raw validados por el programa de calibración, para obtener un ajuste a un modelo mediante un algoritmo de optimización de Levenberg-Marquardt y un algoritmo de selección de datos basado en la proximidad al eje acústico del transductor.
3. Uso directo de los datagramas del fichero raw y realización de la optimización sobre los datos brutos de la calibración. Esta estrategia es la más flexible y permite aumentar el número de mediciones de ecos realizadas durante la calibración en un factor de 10. La optimización se ha realizado empleando un modelo tipo "beam model", tal como se ha definido en la ecuación 4. En la Figura 4 se muestra un registro típico de la ecosonda, donde el eje de ordenadas contiene la profundidad, el eje de abscisas el número de eco registrado y los colores las zonas de detección de las esferas. Así, puede verse que la detección de la esfera es intermitente, al moverse mediante los servomotores durante la calibración.

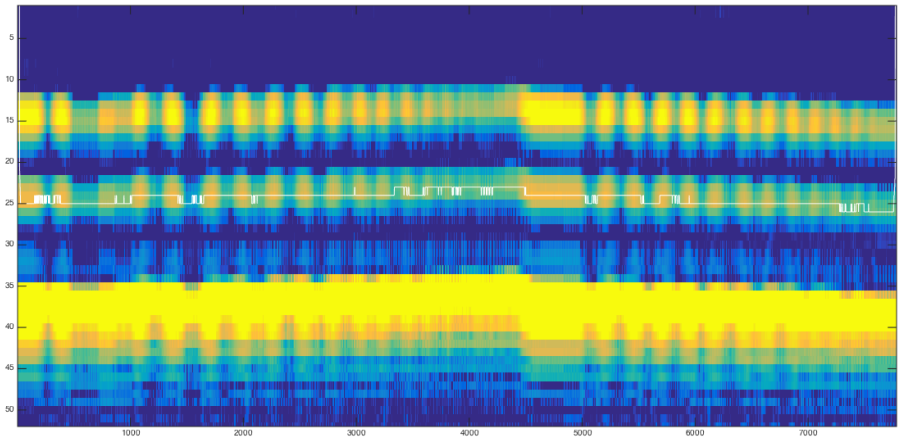



**Figura 4.** Registro de la ecosonda durante la calibración (Esfera de Tungsteno, 18KHz).

## RESULTADOS

Los valores obtenidos por los tres procedimientos descritos para los parámetros de los transductores son bastante similares, aunque el procedimiento 3 tiene la ventaja de utilizar un mayor número de mediciones, por lo que puede ser preferible para reducir el tiempo necesario para la calibración y los valores del error cuadrático medio son inferiores. En la tabla 2 se muestra un ejemplo de resultados obtenidos para la ganancia en el eje del transductor. En la Figura 5 se muestra en forma gráfica los valores de $T_s$ obtenidos en función de los ángulos

*(α,β),* mientras que en la Figura 6 se muestran conjuntamente los valores compensados de $T_s$ junto a los no compensados.

**Tabla 2.** Valores de $G_0$ del transductor de 70 KHz

| Método | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| $G_0$ (dB) | 26.76 | 26.94 | 27.00 |
| Rms (dB) | 0.54 | 0.31 | 0.14 |

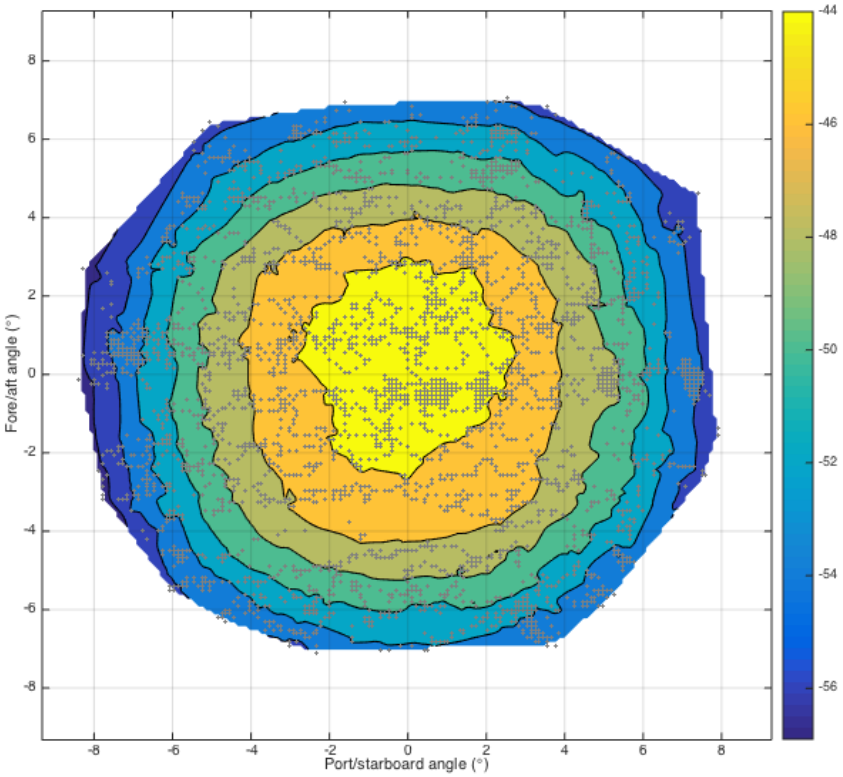



**Figura 5.** Valores de Ts derivados de las medidas efectuadas en la calibración.

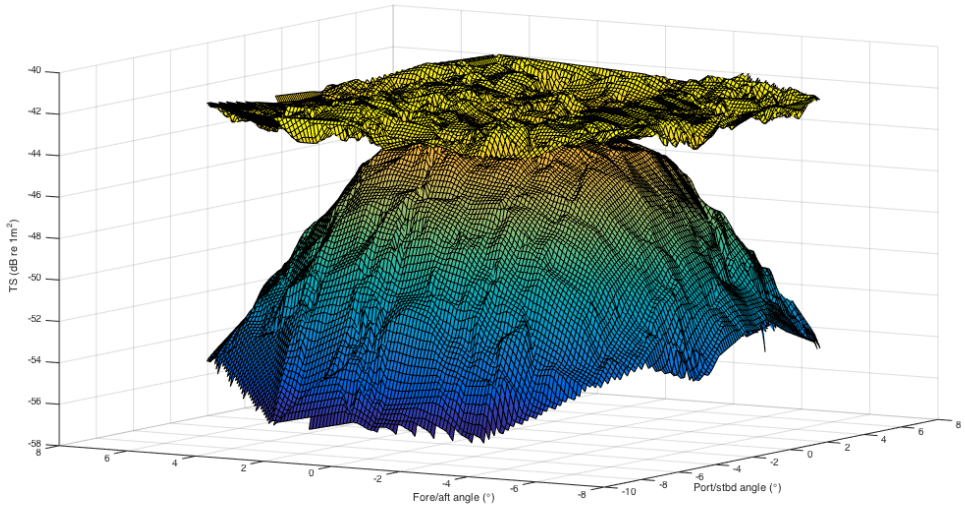



**Figura 6.** Modelo de la ganancia del transductor en función de los ejes (curva inferior). Valores corregidos según el modelo (curva superior).

## CONCLUSIONES

Se ha realizado la calibración de la ecosonda Simrad EK60 mediante la colocación de una esfera de cobre y otra de tungsteno mediante un sistema de tres servomotores controlados por una aplicación software diseñada por el IEO para tal propósito. El procedimiento empleado, descrito en detalle, facilita la toma de datos de la ecosonda durante el proceso de calibración y la obtención de la superficie definida por la directividad (ganancia) de los transductores a las frecuencias de 18, 38, 70, 120 y 200 KHz y la obtención de un número considerable de puntos de medida, que son almacenados en forma de un fichero de texto en un formato definido por Simrad y en forma de datagramas de la ecosonda en ficheros raw.

Los datos obtenidos han sido procesados con tres procedimientos diferentes de calibración: utilizando el fichero texto, empleando el programa de calibración suministrado por el fabricante y su procedimiento de calibración; con los mismos datos, pero utilizando un programa de optimización no lineal de los parámetros del transductor en lenguaje Matlab; y, finalmente, utilizando optimización no lineal con restricciones y los datos raw de la ecosonda.

Los resultados muestran pequeñas variaciones en los parámetros de ganancia, offset y ancho de banda de la superficie de directividad del transductor, tras la aplicación de los tres procedimientos descritos, pero una gran variabilidad en los datos estadísticos (por ejemplo, error rms) que validan los métodos de optimización, lo que se puede explicar por una selección previa de los puntos de medida empleados en la calibración.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación ha sido realizado durante una campaña oceanográfica (Medias 2015) realizada durante los meses de Junio y Julio de 2015, a la que los investigadores de la Universidad de Málaga fueron invitados a participar y quieren agradecer al Instituto Español de Oceanografía y a la Secretaría de Pesca del Gobierno de España por facilitar la realización de este trabajo conjunto y pluridisciplinar, así como el uso de los esquemas mostrados en la Figura 1.

## REFERENCIAS

[Dem15] Demer, D.A. et al.: “Calibration of acoustic instruments”. *ICES Cooperative Research Report* no 326, May 2015.

[Far51] Faran, J.A. “Sound Scattering by Solid Cylinders and Spheres”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **23**(4), 405-418, July 1951.

[Foo87] Foote, K.G.; Knudsen, H.P.; Vestnes,G.; MacLennan, D.N.; Simmonds, E.J.: “Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide”. *ICES Cooperative Research Report* no 144, Feb. 1987.

[Sim05] Simmons, J.; MacLennan, D.: “Fisheries Acoustics. Theory and Practice”, 2e, Blackwell 2005.

[Simrad] Simrad: “Simrad EK500 Operator Manual”.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ONVIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# EL USO DE ECUACIONES ESPECÍFICAS DE CONVERSIÓN TS-TALLA PARA LA ESTIMA DE LA BIOMASA DE PECES EN BALSAS DE ACUICULTURA SOMERAS MEDIANTE MÉTODOS ACÚSTICOS

**PACS:**

Lourdes Encina Encina[1], Victoria Rodríguez Sánchez[1], Amadora Rodríguez Ruiz[1], Carlos OrdunaMartín[1], Juan Ramón Cid Quintero[1], María del Mar Barrios Galán[2], Myriam Retamero Coro[2] y Macarena Algarín Ojeda[2]
1: FIUS; 2: CTAQUA

## RESUMEN

La acuicultura es un sector con demanda creciente en nuestro país y se encuentra en una etapa donde los procesos de producción y comercialización están consolidados. Actualmente, las empresas acuícolas buscan la mejora en la optimización de gastos y el control de la trazabilidad del producto. Para mejorar estos parámetros, es fundamental tener un control exhaustivo sobre el número de peces que se crían en las balsas de cultivo y la biomasa de estas. En primer lugar, para ajustar la dosis de pienso (gasto más relevante en la producción) y en segundo lugar, para mejorar la trazabilidad y el control de la producción final. La hidroacústica ha demostrado ser una técnica eficaz para la determinación de densidad y biomasa de peces, tanto en sistemas de agua dulce como salada. Con este método no intrusivo, se pretende mejorar la fiabilidad de las estimas de densidad y biomasa y reducir el estrés que provocan a los peces los muestreos convencionales. Este trabajo tiene como objetivo la aplicación de esta técnica para la estima de biomasa de peces en balsas de doradas (*Sparusaurata*) y lubinas (*Dicentrarchuslabrax*) en esteros. Para ello, se han elaborado ecuaciones que relacionan el TS (dB), cantidad de sonido que devuelve el pez, con la longitud (mm) de los peces, validándose la eficiencia del uso específico de dichas ecuaciones para la estima de la biomasa de peces en sistemas someros.

## INTRODUCCIÓN

La acuicultura en su conjunto produce hoy en día más de la mitad del pescado consumido en el mundo. En los países europeos meridionales, la dorada (*Sparus aurata*), la lubina (*Dicentrarchus labrax*) y el rodaballo (*Psetta maxima*) son las especies de mayor producción. Concretamente en España la acuicultura produce un 95% del total de las doradas y lubinas comercializadas. A pesar de su importancia, la situación de la acuicultura española no presenta el crecimiento que se esperaba y los acuicultores trabajan para mejorar la eficiencia de sus explotaciones y para reducir los costes de producción.

Las estimaciones del tamaño y biomasa de los peces son esenciales para preparar el plan de producción y gestión de las granjas de peces. El procedimiento habitual empleado en las instalaciones de piscicultura es el muestreo de peces con cierta periodicidad, empleando para ello métodos intrusivos de despesque. Desde Septiembre de 2014 el CTAQUA y la FIUS trabajan en un Proyecto para el uso de métodos hidroacústicos en la gestión acuícola de estos sistemas. A diferencia de los métodos extractivos, los métodos acústicos permiten obtener información sobre la densidad y biomasa de peces de forma no intrusiva, evitando la manipulación directa de los animales y el estrés que esto conlleva.

La llave para la correcta interpretación de los datos de un muestreo hidroacústico es el valor de la fuerza del blaco (TS) que devuelven los peces. Conociendo este valor se construyen ecuaciones de conversión que permiten traducir el sonido devuelto del pez (TS) en parámetros biológicos medibles como su longitud o su peso. Disponer de estas ecuaciones espues imprescindibles,ya que son las que nos permitirán estimar la biomasa empleando las técnicas acústicas.

Aunque existen ecuaciones de conversión para algunas especies, no son suficientes para cubrir las necesidades que la hidroacústica presenta y, aunque pueden usarse ecuaciones de tipo genérico ya publicadas, el hecho de que el TS dependa de aspectos tan característicos de cada especie, como su morfología, el tamaño de su vejiga gaseosa, su tipo de crecimiento, etc, su uso puede dar lugar a estimas poco fiables.

Es por ello que uno de los objetivos del Proyecto ha sido el desarrollo de ecuaciones específicas para las principales especies de cultivo de las empresas participantes en el Proyecto y su aplicación en la estima de la densidad y biomasa de peces en las balsas de engorde. Concretamente las especies con las que se ha trabajado han sido la lubina (*Dicentrarchuslabrax*) y la dorada (*Spaurusaurata*). El grado de exactitud del uso de dichas ecuaciones para la estima de la biomasa en balsas de acuicultura en tierra fue validado en una unidad de cultivo facilitada por la empresa PISTRESA (Trebujena, Cádiz), de la que se conocía el número real de peces, su biomasa y peso medio.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Dado que estas balsas son sistemas de agua someros, se ha utilizado la técnica en su aplicación horizontal, por lo que es necesario introducir en las mismas el factor relacionado con el cambio en el TS devuelto por el pez en función de la orientación de natación. Las ecuaciones han sido pues desarrolladas en cada una de las orientaciones principales: lateral, oblicua y cabeza/cola. Se utilizó una Ecosonda Simrad EK60 de 200kHz y haz partido circular de 7º, aplicándose la metodología de Rodríguez-Sánchez *et al*. (2015).

El diseño experimental para la obtención de las ecuaciones se llevó a cabo en Esta fase se ha desarrollado en las instalaciones que la empresa Pesquerías Isla Mayor S.A. (PIMSA) posee en Veta la Palma. Concretamente en uno de los tanques de la sala de engorde de sus instalaciones de hatchery. Antes de comenzar el experimento se comprobó que la cubeta seleccionada permitiera la adquisición de datos de calidad sin reverberaciones notables procedentes de las paredes de la misma. Para comprobar esto, se realizaron *pruebas de grabación de escucha pasiva* para detectar posibles fuentes de sonido en la piscina. Posteriormente se realizaron pruebas de grabación con emisión de sonido para ver cómo se comportaba el sonido en el tanque y el nivel de reverberaciones que se producía por la acción de las paredes de la cubeta.En uno de los laterales de la cubeta se colocó una estructura de sujeción a la que se le acopló una barra de acero inoxidable que sostenía a su vez el transductor de la ecosonda (**Figura 1**). El centro acústico del transductor se situó en 1 m. Previo a las grabaciones se realizó una calibración del sistema con una bola de calibración de cobre de13 mm de diámetro y sonido conocido de -45dB (20ºC).

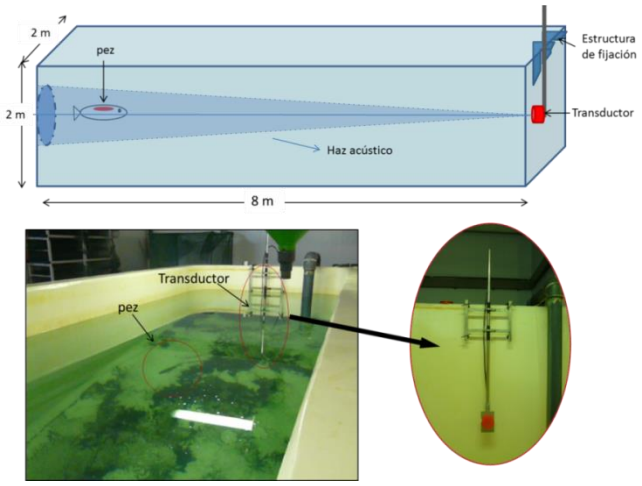



**Figura 1**: Diseño experimental para la obtención de las ecuaciones de conversión horizontal de doradas y lubinas.

Se han analizado los registros sonoros de un total de 15 individuos de lubina y 15 individuos de dorada de diferente talla. Todos los ejemplares seleccionados fueron medidos en (mm): longitud total, longitud furcal y longitud estándar; y pesados (g) antes de ser introducidos en la piscina experimental. La clasificación por talla se hizo en función del grupo de peso al que pertenecen los ejemplares. Los peces se introdujeron individualmente en la cubeta y se insonificaron con natación controlada. Los datos acústicos procedentes de cada uno de los individuos insonificados se procesaron con Sonar 5-Pro (Balk y Lindem, 2012). Los archivos brutos (.raw), se convirtieron con la función 40logR. Una vez obtenidos los ecogramas se procedió de forma manual a la clasificación y registro de trayectorias o tracks de los peces insonificados.

La insonificación de los peces se mantuvo hasta obtener los tracks necesarios para todas las orientaciones del pez. Una vez obtenidos los tracks y calculados los ángulos según la metodología de Rodríguez-Sánchez *et al*. (2015), éstos se clasificaron en intervalos de 10º y se calculó la media de TS para cada intervalo. Más tarde se establecieron 3 categorías que resumían las posiciones angulares en: cabeza/cola, que comprende ángulos entre los 0º-30º y 150º-180º; oblicua, con ángulos entre los 30º-60º y 120º-150º; y lateral, entre los 60º-120º (Boswell y Wilson, 2008).

Las ecuaciones TS-longitud desarrolladas se implementaron en el programa de pos-procesamiento de los datos acústicos (SONAR 5 Pro) a fin de poder aplicarse en las estimas de biomasa mediante técnicas acústicas. También se incorporaron las ecuaciones de regresión longitud-peso de cada una de las especies, necesarias para la conversión entre la talla y peso para el cálculo de la biomasa. Los análisis de regresión se realizaron con el paquete estadístico SPSS. La eficacia de las ecuaciones desarrolladas se verificó a partir del muestreo en la balsa de PISTRESA, contrastándose los resultados de biomasa obtenidos con las ecuaciones específicas y con ecuaciones genéricas.

En concreto se trataba de una unidad mixta de doradas y lubinas de planta rectangular (20m ancho y 220m de largo) y una profundidad media de 2m (**Figura 2)**. Para el muestreo se utilizó una embarcación ligera en la que se colocó la ecosonda, igualmente la Simrad EK60 de 200 kHz y haz partido circular de 7º utilizada en el desarrollo experimental de las ecuaciones. Para el post-procesamiento de los datos acústicos se utilizó el software SONAR 5 Pro v.6.0.1 (Balck and Lindem, 2012), al que se incorporó las ecuaciones TS-longitud y longitud-peso previamente obtenidas.



**Figura 2**. Balsa de las instalaciones de PISTRESA, en Trebujena

Como la balsa estudiada estaba compuesta por lubinas y doradas, pero en más proporción por lubinas, se analizaron los datos empleando la ecuación de conversión de esta especie. Se repitió el análisis pero en este caso utilizando una ecuación mixta con ambas especies, tanto para la conversión TS-talla, como para la conversión talla-peso. Por último, se empleó una ecuación genérica de conversión TS-talla, en concreto la de Kubecka *et al.* (2009).A partir del análisis de los datos acústicos se obtuvo la biomasa media de peces de la balsa (Kg/ha) y el peso medio de los ejemplares, a fin de ser contrastados con los reales proporcionados por la empresa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian diferencias en la respuesta del pez dependiendo de su orientación de natación. Para ambas especies, la orientación cabeza/cola provoca los valores más bajos de TS y las orientaciones laterales producen los sonidos más altos (Figura 3).

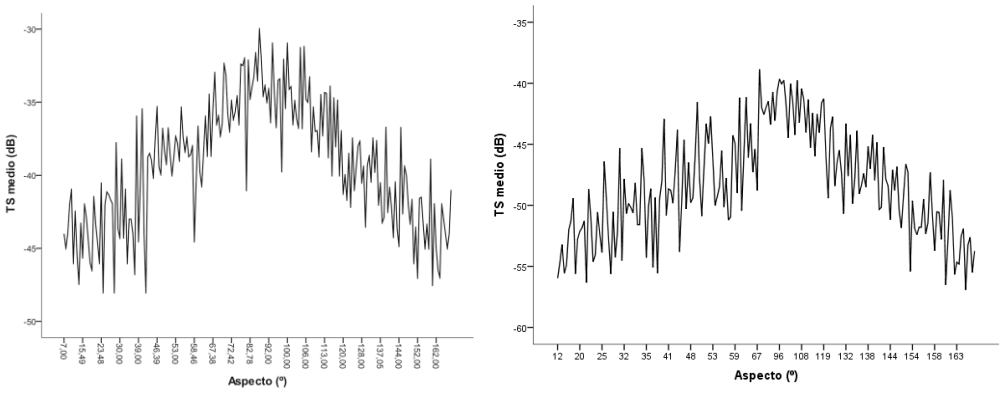



**Figura 3**. Evolución del TS medio (dB) de una dorada de 295 mm de longitud estándar (izquierda) y una lubina de 197 mm de longitud estándar en relación al ángulo de natación (aspecto)

Por otro lado, existe una clara relación entre el TS y la talla de los peces, que a la par es que dependientes de la orientación de natación (Figura 4).

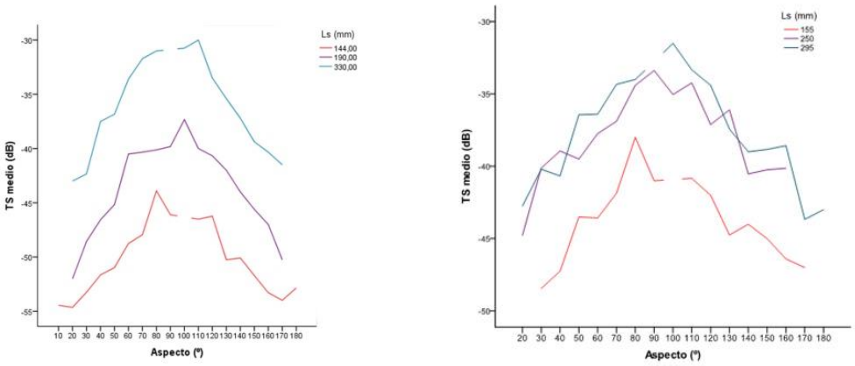



**Figura 4**: Evolución del TS medio de tras lubinas (izquierda) y tres doradas (derecha) de diferente talla.

En la **Figura 5** se muestran los modelos de regresión para la longitud esperada en función del TS de cada especie a partir de las ecuaciones TS-talla y talla-biomasa obtenidas experimentalmente en el muestreo de la balsa de PISTRESA empleando las ecuaciones de lubina y dorada, una ecuación mixta lubina-dorada y la ecuación genérica de Kubecka *et al*. (2009). Los parámetros correspondientes y el ajuste de los modelos se indican en la **Tabla 1**.

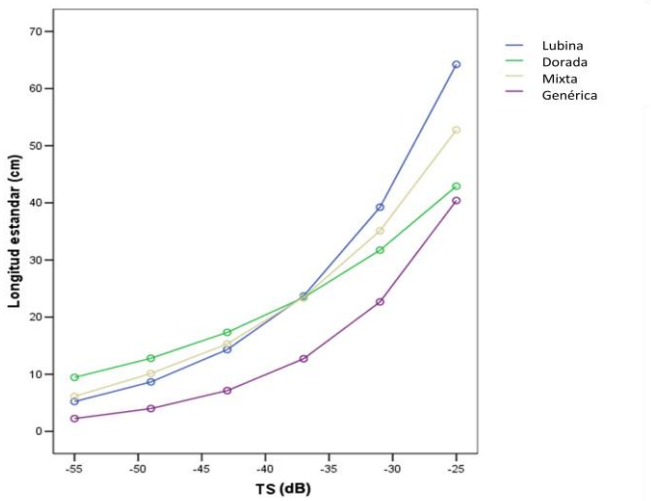



**Figura 5.** Modelos de regresión TS-talla para las ecuaciones obtenidas en este estudio y para la ecuación genérica de Kubecka *et al*. (2009).

**Tabla 1**: Modelos de regresión para la longitud esperada en función del TS de cada una de las especies por separado, conjunta y para la ecuación genérica. $R^2$: ajuste de la regresión; F: f de snedecor; *b*: constante; $p<0.001$ para todas las ecuaciones.

| | $R^2$ | F | b |
|---|---|---|---|
| Lubina | 0.986 | 286.48 | 3.17 |
| Dorada | 0.987 | 300.71 | 1.91 |
| Mixta | 0.979 | 183.4 | 2.68 |
| Genérica | 0.987 | 302.98 | 3.65 |

Como puede observarse, existen importantes diferencias en la longitud estimada a partir de las señales de TS de los datos acústicos. En concreto, mientras que la ecuación mixta y las ecuaciones de lubina y dotada proporcionan resultados en consonancia con los obtenidos en condiciones experimentales, la ecuación genérica proporciona los peores resultados, especialmente en las tallas intermedias. Los modelos de lubina y dorada presentan un comportamiento ajustado al crecimiento propio de cada una de las especies. Mientras que la lubina es una especie que crece más en longitud que en anchura, la dorada crece relativamente más en anchura que en longitud, lo que se refleja en las diferencias dependientes de los modelos de regresión de ambas especies, mayor en la lubina que en la dorada. La ecuación mixta, como era de esperar, se sitúa entre los dos modelos.

Las diferencias de longitud generadas por cada una de las ecuaciones, si bien pueden parecer pequeñas, se traducen en importantes diferencias de biomasa, especialmente en especies como las lubinas y doradas, en las que un incremento de 100 mm puede llegar a equivaler a más de 300 g en el caso de las lubinas, y más de 500 g en las doradas.

En la **Tabla 2** se recogen los resultados de las estimas de biomasa y peso medio obtenidos en la balsa de las instalaciones de PISTRESA. Sólo se han empleado las ecuaciones de lubina, al ser la especie proporcionalmente más abundante y la mixta lubina-dorada, a fin de verificar la idoneidad de las mismas. Como puede observarse, el peso medio procedente del empleo de la ecuación de la lubina es menor que el procedente de la ecuación mixta, siendo esta última la que ha dado valores más ajustados al peso medio real de los peces proporcionados por la ecosonda: 297,5 g. Evidentemente esta diferencia en el peso medio estimado por la ecosonda con una u otra ecuación va a tener una implicación directa en la biomasa estimada, siendo mayor en el caso de la ecuación mixta que cuando se usó la ecuación de la lubina. Como puede comprobarse nuevamente, la ecuación mixta arroja una estima dentro del rango real de la balsa, según los datos proporcionados por la empresa.

**Tabla 2**: Resultados de biomasa estimados implementando las ecuaciones desarrolladas.

| | **Peso medio (g)** | **Biomasa (Kg/ha)** |
|---|---|---|
| **Ecuación lubina** | 205,15 | 10.884 |
| **Ecuación mixta** | 292,10 | 18.618 |
| **Datos PISTRESA** | 297,50 | 14.293-19.653 |

## CONCLUSIONES

Para obtener ecuaciones exactas que relacionen el TS con la longitud total del pez en hidroacústica horizontal, es necesaria la utilización de un transductor de haz partido ya que nos permiten medir ubicaciones angulares de ecos en el volumen insonificado, como así lo demuestran los resultados obtenidos en este estudio. En el proceso de adquisición de datos, un método de cálculo adecuado para obtener el ángulo de incidencia del haz acústico sobre los peces es crucial para obtener datos correctos.

En un estudio hidroacústico, la elección de una ecuación de conversión TS-longitud adecuada es fundamental para la obtención de estimas precisas del tamaño y biomasa de los peces (Boswell y Wilson, 2008). Como se ha probado en estudios anteriores la elección de una ecuación u otra, incluso el método empleado para el cálculo de esta ecuación, puede influir significativamente en el resultado final de la relación TS-talla. Estas variaciones, aun siendo mínimas, provocarían una gran variación en el cálculo final de biomasa de las balsas pretendido en este estudio ya que una pequeña variación por pez se acumularía de gran manera, teniendo en cuenta que las balsas más pequeñas suelen contar con unos 15000-2000 peces.

Las ecuaciones desarrolladas a partir del diseño experimental desarrollado para la insonificación de las especies lubina y dorada con natación controlada, ha producido resultados válidos y de alta calidad para el estudio de la biomasa de estas dos especies en balsas de acuicultura en tierra. Dichos resultados indican que se pueden obtener estimas fiables de la biomasa de peces en este tipo de explotaciones piscícolas a partir de métodos hidroacústicos, siempre que se empleen ecuaciones de conversión TS-talla apropiadas a cada especie, lo que abre unas enormes expectativas de aplicación y futuro del uso de estas técnicas en la gestión de los cultivos piscícolas en tierra.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este estudio agradecen la colaboración de las empresas PIMSA y PISTRESA, ofreciendo sus instalaciones para el desarrollo del mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

Balk and Lindem, 2012. Sonar4 and Sonar5 post processing systems, Operator manual version 5.9.9, 438p. Lindem Data Acquisition Humleveien 4b.0870 Oslo Norway.

Boswell, K. M., and Wilson, C. A. 2008. Side-aspect target strength measurements of bay anchovy (*Anchoamitchilli*) and Gulf menhaden (*Brevoortiapatronus*) derived from *ex situ* experiments. ICES Journal of Marine Science, 65: 1012–1020.

Kubečka, J., Hohausová, E., Matěna, J., Peterka, J., Amarasinghe, U. S., Bonar, S. A., & Winfield, I. J. 2009. The true picture of a lake or reservoir fish stock: a review of needs and progress. *Fisheries Research*, *96*(1), 1-5.

Rodríguez-Sánchez, V.; Encina-Encina, L.; Rodríguez-Ruiz, A.; Sánchez-Carmona, R. 2015. Horizontal target strength of Luciobarbus sp. in *ex situ* experiments:Testing differences by aspect angle, pulse length and beam position. *Fisheries Research*, 164:214-222.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# USO DE ECOSONDAS CIENTÍFICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TALLA DE PECES A CORTAS DISTANCIAS

PACS: 43.30.-k

Ester Soliveres, Vicente Puig, Patricia Ordóñez, Vicente D. Estruch, Isabel Pérez-Arjona, Víctor Espinosa

Institut de Investigació per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres (IGIC), Universitat Politècnica de València, c/ Paranimf, 1, 46730, Gandia, Valencia, España

essogon@upv.es, vipuipon@upv.es, patorceb@upv.es, vdestruc@upv.es, vespinos@upv.es

## ABSTRACT

Acoustic techniques can be a useful tool for biomass estimation, passing by size and abundance of fish estimations. Currently the scientific echo sounders are used for fisheries stock assessment, however its application is not immediate in sea cages because the proximity of fish to the transducer implies a set of complications and uncertainties. In this work the viability of such systems for size estimation of individual specimen in a scale sea cage is studied.

## RESUMEN

Las técnicas acústicas pueden resultar una herramienta útil para la estimación de la biomasa, que pasa por la determinación de la talla y la abundancia de peces. Actualmente se utilizan ecosondas científicas para la evaluación del stock pesquero, sin embargo su aplicación en jaulas marinas no es inmediata debido a que la proximidad de los peces al transductor lleva implícita una serie de complicaciones e incertidumbres. En este trabajo se estudia la viabilidad de estos sistemas para la determinación de la talla de ejemplares individuales en una jaula a escala.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la potencia acústica del blanco o el target strength (*TS*) es crucial para la evaluación de la biomasa total de peces en interior de jaulas de piscifactoría mediante técnicas ultrasónicas no invasivas. El *TS* proporciona una estimación indirecta del tamaño de los peces mediante el uso de ecosondas científicas, que son ampliamente empleadas para la evaluación del stock pesquero.

Actualmente se conocen pocos ensayos llevados a cabo en jaulas marinas flotantes, donde los peces se encuentran muy próximos al transductor (Knudsen *et al.*, 2004; Zhao, 1996; Ona, 2003; Nielsen & Lundgren, 1999; Jørgensen, 2004; Kang & Hwang, 2003; Kang *et al.*, 2004). El

uso de ecosondas científicas para la medida del *TS* a cortas distancias adquiere cierta problemática debido entre otros al efecto de campo cercano de los peces, los errores cometidos en la compensación de las pérdidas debidas a la propagación de la onda, los errores en la estimación de los ángulos y la alteración de la envolvente debido al tamaño finito de los peces. Sin embargo, la detección de peces a cortas distancias resulta inevitable en jaulas flotantes en condiciones de producción, donde a pocos metros del transductor se vuelve difícil la obtención de detecciones procedentes de ejemplares individuales debido a la elevada densidad del cardumen de peces. Por estos motivos se considera necesario evaluar la aplicación de ecosondas científicas para la estimación indirecta del tamaño de peces en jaulas.

En este trabajo se estudia la viabilidad del uso de ecosondas científicas split-beam en la estimación indirecta del tamaño de ejemplares individuales de dorada a partir de la medida directa del *TS*. La estimación precisa de la talla de los peces es un aspecto muy importante en la gestión de piscifactorías, y el establecimiento de una relación entre el *TS* y la longitud total puede resultar una herramienta eficaz para la estimación de la talla mediante técnicas acústicas no invasivas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar la dependencia del *TS* con el tamaño de los peces se establecieron 5 grupos diferentes de dorada en función de su longitud total *L*, abarcando casi todo el rango de tallas manejadas en una piscifactoría de engorde. Se caracterizó el *TS* o la energía acústica retrodispersada por ejemplares individuales de forma ventral y dorsal para las diferentes tallas establecidas, empleando una ecosonda split-beam a 200 kHz y mediante el seguimiento de la trayectoria de peces aislados en una jaula de piscifactoría a escala. Las mediciones biométricas y acústicas se llevaron a cabo en el tinglado nº 3 muelle frutero del Puerto de Gandia, sede de la Unidad de Tecnología de Estudios Marinos (UTEM). La jaula experimental se instaló en la lámina de agua situada enfrente del tinglado.

En primer lugar se predefinieron 5 grupos con diferencias de talla entre grupos sucesivos de forma que las variaciones del *TS* fueran de 1.50 dB, correspondiendo a variaciones del 19% de la longitud, y aceptando dispersiones de ±0.14 dB, que correspondían a variaciones del 1.6% en longitud. Para el cálculo se compararon las estimaciones obtenidas a partir de la expresión teórica que relaciona el *TS* con la longitud del pez (Ec. 1) con la expresión de Love (Love, 1977). En ambos casos se obtuvieron estimaciones muy similares.

$$TS \approx 20 \cdot \log L + cte \qquad \text{Ec. 1}$$

Se realizaron biometrías a un total de 1263 ejemplares vivos, anotando datos de masa *M* y longitud total. Estos datos permitieron clasificar los peces en 5 tallas diferentes y obtener expresiones que relacionan ambas variables para la dorada. Se formaron grupos de unos 20 ejemplares, asumiendo que este número era suficientemente reducido como para evitar detecciones procedentes de múltiples blancos, pero lo bastante elevado como para poder observar un número considerable de ecos procedentes de blancos aislados. En algún grupo fue necesario variar ligeramente el rango de tallas para obtener un número suficiente de ejemplares. En la Tabla 1 se resumen el número de peces que forman cada grupo, la longitud y la masa promedio, y el coeficiente de variación de la longitud $CV_L$.

Tabla 1. Número de ejemplares de cada grupo, longitud media, masa media y coeficiente de variación de la longitud

| *Grupo* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| *Nº* | 22 | 20 | 24 | 20 | 21 |
| *L* (cm) | 15.3 | 16.8 | 18.7 | 22.2 | 26.4 |
| *M* (g) | 49.4 | 69.1 | 100.4 | 169.7 | 288.8 |
| $CV_L$ (%) | 2.3 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 0.9 |

Al finalizar las mediciones acústicas se volvió a muestrear a los peces para comprobar que la longitud y la masa no sufrían variaciones significativas. A la vista de los resultados se pudo asumir que no se debían apreciar variaciones del *TS* debidas a cambios en la talla de los peces. Puesto que la longitud es el parámetro biométrico más utilizado en acústica de pesquerías y la masa es la variable comúnmente empleada en la gestión de piscifactorías, se ha obtenido la expresión que relaciona la masa y la longitud,

$$M = 0.0102 \cdot L^{3.1521} \qquad \text{Ec. 2}$$

siendo *M* la masa expresada en g y *L* la longitud en cm. Ambas variables guardan un fuerte grado de correlación, pues el coeficiente de determinación es igual a 0.9715.

Se empleó una ecosonda científica EK60 de Simrad junto con un transductor split-beam ES200-7C, con una frecuencia de trabajo de 200 kHz y un haz estrecho con una apertura de 7º, para la medida directa del *TS*. El transceptor fue controlado mediante un portátil, comunicados entre sí mediante el puerto Ethernet. El transductor se instaló en el centro de la jaula, en el fondo y dirigido verticalmente hacia arriba para las mediciones ventrales, y en la superficie orientado hacia abajo para la medida del aspecto dorsal del *TS*.

Cada uno de los grupos fue caracterizado acústicamente por separado tanto ventral como dorsalmente. Se introdujeron los ejemplares de cada grupo en la jaula experimental, que presentaba un diámetro de 5 m y una profundidad de 4 m (Figura 1). Se considera una jaula a escala, pues las jaulas de engorde de dorada poseen diámetros entre 12 y 15 m y profundidades entre 10 y 25 m.



Figura 1. Jaula a escala de 5 m de diámetro amarrada enfrente del tinglado nº 3 del muelle frutero del Puerto de Gandia.

Se confeccionó una estructura secundaria para facilitar la instalación del transductor en el fondo de la jaula y la extracción de los peces al finalizar las mediciones acústicas de cada talla, formada por un anillo de 5 m de diámetro que circunscribe una cruz, y envuelta con una malla en forma de cilindro cerrada por el extremo inferior. Esta estructura se introducía dentro de la red que da forma a la jaula.



Figura 2. Detalle de la estructura secundaria empleada para la instalación del transductor en el fondo de la jaula y facilitar la extracción de los peces.

Se empleó un nivel de fuente de 217.2 dB ref. 1 µPa @ 1 m (equivalente a una potencia de transmisión de 90 W), una longitud de pulso de 64 µs y un intervalo entre pings de 50 ms. El nivel de fuente elegido aseguraba una buena relación señal a ruido y evitaba la aparición de efectos no lineales (Tichy *et al.*, 2003; Pedersen, 2006). La duración del pulso era capaz de resolver dos peces próximos de la menor talla ensayada, teniendo en cuenta que los peces han de estar separados al menos media longitud de pulso (Simmonds & MacLennan, 2005) y que la separación entre peces comúnmente es la tercera parte de la longitud de los peces (Patridge, 1982). El intervalo entre pings se eligió de forma que una traza poseyera un elevado número de ecos y no se generase ruido de reverberación.

Debido a la resolución angular del transductor (0.061º), a distancias próximas al transductor el tamaño de los peces o de su vejiga era relativamente grande respecto al tamaño de la celda y podía llegar a abarcar un elevado número de celdas, introduciendo una incertidumbre en la compensación del patrón de directividad del transductor. Se considera una celda a la mínima superficie perpendicular al eje acústico que es capaz de discriminar el transductor a una distancia dada.

Se registraron datos durante aproximadamente 72 horas para cada talla y posición del transductor (en el fondo de la jaula y en la superficie). Durante los ensayos se tomaron datos de la temperatura del agua a una profundidad de 1 m para el cálculo de la velocidad del sonido y el coeficiente de absorción. Se realizó la calibración de la ecosonda antes, durante y al finalizar las mediciones siguiendo el procedimiento recomendado por Simrad mediante el método del blanco estándar (Simrad, 2009), obteniendo resultados aceptables. Se comprobó que el intervalo entre pings influía en los resultados obtenidos, por lo que se optó por emplear la misma configuración empleada en la medida del *TS*. Se obtuvieron ganancias 0.37 inferiores para un intervalo entre pings de 50 ms en relación a 1 s, que es el valor recomendado por Simrad.

Los datos acústicos fueron procesados con el programa Sonar5 –Pro (Balk & Lindem, 2011) y tratados estadísticamente en Matlab. El primer paso fue la detección de ecos procedentes de blancos aislados, basándose en criterios de amplitud, duración y fase del eco. Un eco se acepta como válido si cumple todos los criterios: umbral mínimo ($TS_{mín}$), longitudes de eco mínima y máxima (*mLE* y *MLE*) relativas a la duración del pulso, máxima desviación de fase (*MDF*) de las muestras del eco, máxima compensación de ganancia (*MCG*), y existencia de múltiples picos (*MP*). Se aceptan aquellos ecos con un $TS_{mín}$ de -55 dB, una *mLE* de 0.5, una *MLE* de 2.0, una *MDF* de 1.0º, una *MCG* de 12 dB y con picos múltiples inferiores a 1.5 dB.

Antes de comenzar el análisis se delimitó el rango de interés, siendo variable de un ping a otro. La distancia mínima quedó limitada por la distancia a campo lejano del transductor (≈70 cm) y la distancia máxima quedó definida por la superficie del mar en los registros ventrales y por el fondo de la jaula en los registros dorsales. La distancia máxima fue definida de forma apropiada con la herramienta *Bottom Detector* de Sonar5-Pro.

A continuación se realizó el seguimiento automático de la trayectoria de los peces o *tracking*, que consiste en la combinación de ecos sucesivos procedentes de un mismo blanco para formar una misma traza y de ecos que procedente de blancos diferentes en trazas separadas. Para ello se emplea la herramienta *Advanced Multiple Target Tracking*, que acepta como traza válida aquella sucesión de ecos individuales que abarque una longitud dada y no pierda más de cierto número de pings. El detector va prediciendo la posición del siguiente eco y si halla algún eco que cumpla los criterios lo incorpora a la traza. Se comparan los resultados obtenidos para longitudes de traza de 2, 3, 4 y 5º, con un máximo de dos pings sucesivos perdidos.

En Matlab se importaron los ecos que formaban las trazas y se clasificaron según su calidad, aplicando unos criterios del detector de ecos más estrictos. Se aceptaron ecos con una longitud entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3º, y se compararon resultados para una *MCG* de 3, 6 y 12 dB. El uso de criterios menos estrictos facilita la definición de las trazas, y la utilización de los ecos de calidad permite una estimación más precisa de la talla. A partir de los ecos de calidad se evaluaron diferentes estadísticos del *TS* de las trazas: máximo, media, moda, percentiles 25,

50 y 75. Para cada uno de ellos se obtuvo la distribución de probabilidad. De igual modo se evaluó el uso de diferentes estadísticos de las distribuciones. Por último, se obtuvieron las relaciones existentes entre el *TS* y el logaritmo en base 10 de la longitud total de la dorada, resolviendo qué estadístico de las trazas y las distribuciones proporcionaban mejores ajustes.

## RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra la densidad de probabilidad del *TS* de las trazas para las diferentes tallas ensayadas, a intervalos de 0.5 dB y ordenado de menor a mayor tamaño. Se representan las distribuciones para el *TS* máximo de las trazas medidas ventralmente y el *TS* medio para los registros dorsales, por ser los estadísticos de las trazas que mejor correlacionaban con la longitud de la dorada. Los resultados se han obtenido a partir de trazas con una longitud angular mínima de 2º y con una *MCG* de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los dorsales, que corresponden a una apertura del haz de 7 y 12º. El uso de trazas cortas y procedentes de las posiciones más cercanas al eje también mejoró la correlación entre el *TS* y la talla. Sin embargo, el reducido número de trazas registradas dorsalmente obligó a aumentar la *MCG* a 12 dB, pues al disminuir la *MCG* se reducía considerablemente el número de trazas.

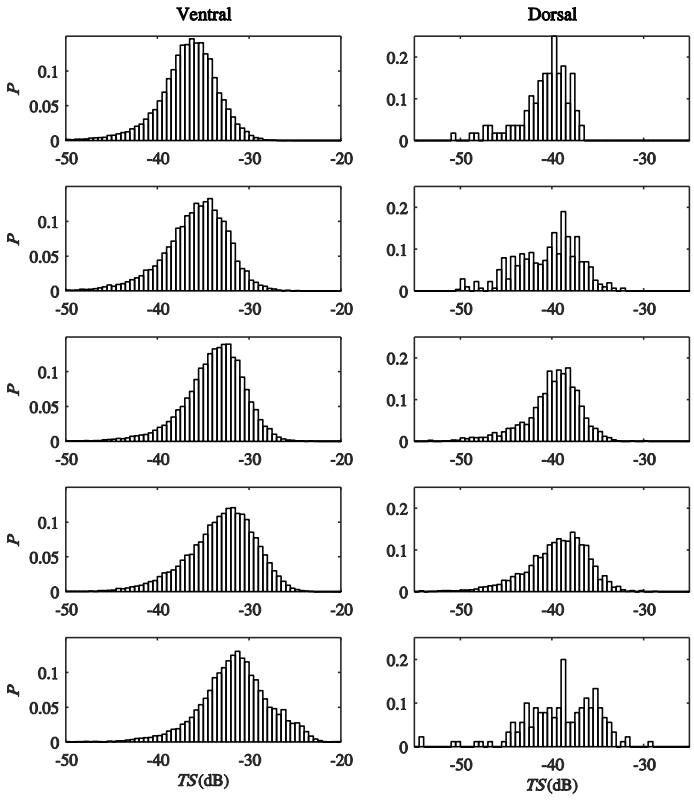



Figura 3. Densidad de probabilidad del *TS* máximo de las trazas para los registros ventrales (izquierda) y del *TS* medio para los registros dorsales (derecha) para la dorada a 200 kHz.

Los registros ventrales mostraron distribuciones unimodales para todas las tallas, mientras que los histogramas obtenidos dorsalmente podrían presentar bimodalidad para alguna talla, aunque tal vez pudo deberse a la escasez de trazas detectadas. Puesto que las dos tallas con mayor número de detecciones presentaban una distribución unimodal, conlleva a pensar que dorsalmente también presenten distribuciones unimodales. La unimodalidad puede deberse a una reducida directividad de la vejiga de la dorada a 200 kHz, de forma que la detección de los lóbulos secundarios se vuelva insignificante. Estos resultados coinciden parcialmente con lo

observado por Knudsen et al. (2004), que obtuvieron distribuciones unimodales de forma ventral y bi o trimodales de forma dorsal.

Como era de esperar, la media y la desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas presentan una tendencia a aumentar con la talla de los peces, como sugieren Clay y Heist (1984), a pesar de los posibles errores cometidos en la medida del *TS* a cortas distancias. En general, dorsalmente se obtuvieron valores medios entre 1.4 y 6.1 dB inferiores a los obtenidos ventralmente, registrando mayores diferencias para las tallas mayores, tal vez debido al apantallamiento de la vejiga por la espina dorsal.

Igualmente, se ha observado un aumento del promedio y la dispersión de la longitud del eco con la talla, al igual que sucede con la *MDF*.

Se ha evaluado la correlación existente entre los diferentes estadísticos de las distribuciones frente a la talla de la dorada, y se ha comprobado que la media es el parámetro que proporciona ajustes más robustos teniendo en cuenta el coeficiente de determinación, el p-valor y el error en la estimación. Los estadísticos de las trazas que mejor han funcionado son el máximo, la media y el percentil 75, siendo el máximo el más apropiado para los registros ventrales y la media para los dorsales. A partir de las grabaciones ventrales se obtienen mejores ajustes al reducir la longitud de la traza, la *MDF* y la *MCG*, siendo este último el factor más influyente en base al coeficiente de determinación y al error cometido en la estimación, aunque también es el que más ha afectado al número de trazas detectadas junto con la longitud de la traza. Las expresiones obtenidas de forma ventral (Ec. 3) y dorsal (Ec. 4) son las siguientes:

$$TS_{máx}\left(dB\right) = 23.06 \cdot \log L\left(cm\right) - 62.68 \quad R^2 = 0.9745 \qquad \text{Ec. 3}$$

$$TS_{máx}\left(dB\right) = 10.34 \cdot \log L\left(cm\right) - 52.16 \quad R^2 = 0.9813 \qquad \text{Ec. 4}$$

La pendiente y la ordenada en el origen obtenidas a partir de los registros ventrales se encuentran dentro de los rangos esperados según la literatura para detecciones a mayores distancias. Sin embargo los valores obtenidos dorsalmente son algo reducidos, aunque según McClatchie *et al.* (2003) la pendiente puede tomar valores entre 18 y 30 según la especie para blancos situados a mayores distancias.

En la Figura 4 se representa la relación lineal entre el valor promedio de las distribuciones del *TS* de las trazas y el logaritmo en base 10 de la longitud total de la dorada. Se muestran los resultados para el *TS* máximo de las trazas registradas ventralmente y el *TS* medio observado de forma dorsal.

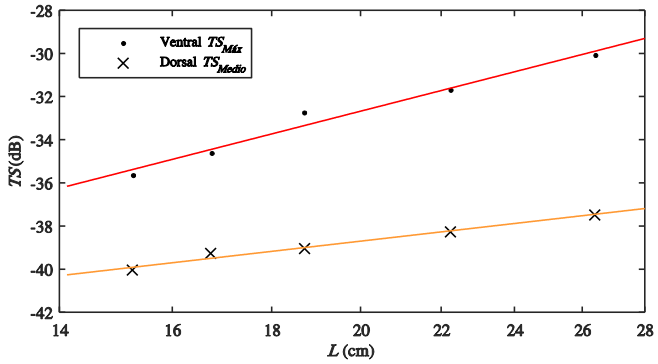



Figura 4. Relación lineal entre la media del *TS* máximo de las trazas y el logaritmo de la longitud para los registros ventrales, y la media del *TS* medio de las trazas para las grabaciones dorsales a 200 kHz.

Se puede apreciar un fuerte grado de correlación entre ambas variables tanto para el aspecto ventral como para el dorsal, como sucede para otras muchas especies. Aunque el número de

trazas registradas de dorsalmente ha sido reducido, también se ha obtenido una fuerte correlación.

Ya que el nivel registrado ventralmente es mayor que el registrado dorsalmente para los diferentes estimadores de las trazas, y la pendiente también es mayor ventralmente, se recomienda el uso del aspecto ventral del *TS* para la estación de la talla. De esta forma se pueden conseguir ecos con una mayor relación señal a ruido y una pequeña variación en el tamaño de los peces producirá una mayor variación del *TS*, pudiendo facilitar la discriminación entre tallas próximas y mejorar la precisión del método.

A partir de la expresión que describe la relación entre la longitud frente al *TS* ($L = a \cdot 10^{b \cdot TS}$) se puede estimar el error medio cometido en la estimación de la longitud a partir de la medida directa del *TS*. Se ha obtenido un error medio del 2.5% para la configuración ventral y de 2.0% para la dorsal, muy similar a la precisión proporcionada por sistemas de cámaras esteroscópicas como Vicass o AQ1 (2%). Al igual que sucede con la longitud, la masa guarda una relación de tipo potencial con el *TS.* Y el error correspondiente asociado a la estimación de la masa a partir del *TS* fue de 6.5% para los registros ventrales y del 6.1% para los dorsales.

## CONCLUSIONES

Las relaciones entre la longitud y la masa de la dorada han quedado determinadas mediante una expresión de tipo potencial, obteniendo fuertes grados de correlación.

Pese a la proximidad del blanco estándar al transductor se han logrado calibraciones exitosas, con diferencias de hasta 0.37 dB para los diferentes intervalos entre pings evaluados.

Se ha conseguido determinar la dependencia del *TS* con la longitud de la dorada con un fuerte grado de correlación tanto ventral como dorsalmente, a pesar de la problemática que presenta la medida del *TS* a distancias próximas al transductor. Se puede asumir que las distribuciones observadas son unimodales, pudiendo significar que en todo momento se detecta el lóbulo principal del patrón de directividad de los peces. Los valores registrados ventralmente son superiores a los obtenidos dorsalmente, seguramente debido al apantallamiento de la vejiga por la espina dorsal del animal. La media de las distribuciones y el *TS* máximo de las trazas y el *TS* medio de las trazas son los estadísticos que proporcionan ajustes más robustos frente a la longitud. De igual modo la exclusión de ecos procedentes de las posiciones más lejanas al eje mejora la bondad de los ajustes. De igual modo se han obtenido las expresiones que describen la relación entre la longitud y la masa frente al *TS*, que permiten el cálculo del error relativo medio cometido en la estimación de la longitud o la masa. Se ha comprobado que la precisión obtenida es prácticamente igual a la proporcionada por sistemas de cámaras estereoscópicas comerciales. Los resultados obtenidos se consideran válidos dentro de un rango de 2 a 4 m, pues la mayoría de detecciones proceden de este rango de distancias. Además este suele ser el rango de detección en jaulas en condiciones de producción, debido a que mayores distancias resulta difícil discriminar peces aislados por la elevada densidad del cardumen.

Tal vez se han obtenido relaciones lineales entre el *TS* y el logaritmo de la longitud debido a que el rango evaluado es muy estrecho, de forma que los diferentes factores de corrección para la compensación de los efectos debidos a la proximidad de los peces al transductor sean muy similares en este rengo. El uso de pulsos de muy corta duración puede disminuir los errores por el uso de la aproximación asintótica de la compensación de las pérdidas por propagación y el instante inicial del eco, al ser la distancia de detección mucho mayor a la longitud del pulso. Por otro lado, considerando las dimensiones de la vejiga como el principal elemento dispersor, las detecciones pueden haberse realizado en el campo lejano de los peces, siendo consistente con la correlación hallada entre el *TS* y la longitud.

**REFERENCIAS**

Balk, H., Lindem, T., 2011. *Sonar4 and Sonar5-Pro post processing systems. Operator manual version 6.02.* Oslo, Norway.

Clay, C., Heist, B.G., 1984. Acoustic scattering by fish – Acoustic models and a two-parameter fit. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, no. 4, pp. 1077-1083.

Jørgensen, R., 2004. *The effects of behaviour on the acoustic target strength of capelin (Mallotus villosus) and implication for acoustic abundance estimation.* PhD Thesis. Univertiy of Tromsø. Norwey.

Kang, D., Hwang, D., 2003. *Ex situ* target strength of rockfish (*Sebastes schlegeli*) and red sea bream (*Pagrus major*) in the northwest Pacific*. ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 2, pp. 1081-1085.

Kang, D., Sadayasu, K., Mukai, T., Iida, K., Hwang, D., Sawada, K., Miyashita, K., 2004. Target strength estimation of black porgy *Acanthopagrus schlegeli* using acoustic measurements and a scattering model. *Ficheries Science*, vol. 70, no. 5, pp. 819-828.

Knudsen, F., Fosseidengen, J., Oppedal, F., Karlsen, Ø., Ona, E., 2004. Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (*TS*) measurements on Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Fisheries Research*, vol. 69, no. 2, pp. 205-209.

Love, R.H., 1977. Target strength of an individual fish at any aspect. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62, no.6, pp. 1397-1403.

McClatchie, S., Macaulay, G., Coombs, R., 2003. A requiem for the use of 20 log10 length for acoustic target strength with special reference to deep-sea fishes. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 2, pp. 419-428.

Nielsen, J.R., Lundgren, B., 1999. Hydroacoustic *ex situ* target strength measurements on juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 56, no. 5, pp. 627-639.

Patridge, B.L., 1982. The structure and function of fish schools. *Sci. am.,* Jun, vol. 246, no.6, pp. 114-123.

Ona, E., 2003. An expanded target strength relationship for herring. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 493-499.

Pedersen, A., 2006. *Effects of nonlinear sound propagation in fisheries research.* PhD Thesis. University of Bergen.

Simmonds, J. MacLennan, D.N., 2005. *Fisheries acoustics: Theory and practice.* Second edition ed. Blackwell Science.

Simrad, 2008. *Simrad ER60, scientific echo sounder. Reference manual.*

Tichy, F., Solli, H., Klaveness, H., 2003. Non-linear effects in a 200-kHz sound beam and the consequences for target-strength measurements. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 571-574.

Zhao, X., 1996. *Target strength of herring (Clupea harengus L.) measured by split-beam tracking method.* Mphil Thesis. University of Bergen. Norwey.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CARACTERIZACIÓN DEL TARGET STRENGTH DE GRANOS DE PIENSOS COMERCIALES PARA ACUICULTURA MEDIANTE ECOSONDA MONOHAZ

43.30.-K UNDERWATER SOUND

Llorens, Susana; Pérez-Arjona, Isabel; Soliveres, Ester; Ordóñez, Patricia; Puig, Vicent; Espinosa, Víctor
Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras. UPV
Carretera Nazaret-Oliva, s/n 46730 Grao de Gandia (Valencia)
España
Teléfono: +34 962849368
Fax: +34 962849337
igic@upv.es

## ABSTRACT

One of the lines of research in aquaculture is aimed to reduce the economic and environmental impacts associated with the excessive food dispensing in sea cages. Underwater acoustics can be an effective tool to determine the moment when the fish are satiated and food isn't being ingested. The aim of the present study is the acoustic characterization of different feed sizes by determining the target strength. The methodology is the bottom-up insonification of the pellets descending from the surface by a single-beam echosounder. The results show a linear relationship between target strength and feed size.

## RESUMEN

Una de las líneas de investigación en acuicultura está enfocada a reducir los impactos económicos y ambientales relacionados con la dispensación excesiva de alimento en las jaulas submarinas. La acústica submarina puede ser una herramienta eficaz con el fin de determinar el momento en el los individuos están saciados y el alimento dispensado cae al fondo sin ser ingerido. El propósito del trabajo es la caracterización acústica, mediante la determinación del *target strength*, de diferentes calibres de granos de pienso. La metodología utilizada es la insonificación desde abajo de los *pellets* en descenso desde la superficie, mediante un transductor monohaz. Los resultados muestran una relación lineal entre el *target strength* y el calibre de los granos.

## INTRODUCCIÓN

Existen una gran variedad de cultivos acuícolas en medio marino en los que la alimentación de los individuos está constituida por piensos comerciales. Actualmente gran parte de la inversión económica de una piscifactoría es en la alimentación de los organismos, llegando a ser del 50 a 60% en el caso del cultivo de salmón [1]. No es tarea sencilla conocer el momento en el que los individuos ya han ingerido la cantidad de alimento necesaria y rentable para un adecuado crecimiento. Habitualmente se determina el cese del suministro por observación, se considera

que los individuos están saciados si la cantidad de peces que están en la parte superficial, dónde acuden a alimentarse, es nula o notablemente inferior a la que hay en los primeros momentos del proceso de alimentación. Este método se dificulta por la elevada densidad de individuos y la turbidez del agua [2], lo que lo hace aun más inexacto. Debido a esta inexactitud se aporta pienso en exceso, se pierde cerca del 8,26% del alimento total [3], lo que conlleva el correspondiente gasto económico y un impacto ambiental añadido por el exceso de materia orgánica que se deposita en el lecho marino que provoca un enriquecimiento en nutrientes [4].

Por motivos económicos y ambientales existe un interés en diseñar métodos que permitan suministrar la cantidad óptima de alimento para el cultivo en jaulas marinas. Se han desarrollado diferentes estudios orientados a aportar una cantidad óptima de alimento a los individuos de cultivo, desde el cálculo de la cantidad de pienso necesaria para un cultivo mediante la recolección de los granos no ingeridos [5] hasta un mecanismo de "auto-alimentación" en el que, mediante mordiscos de los peces, se activa el dispensador de alimentos, no siendo totalmente eficiente porque en ocasiones se produce "alimentación accidental" [6]. También se han llevado a cabo mecanismos de control indirecto del proceso, como los "sistemas de retroalimentación interactiva", basados en el ajuste de la cantidad de alimento mediante la detección de los *pellets* no ingeridos o mediante la evaluación del comportamiento de alimentación de los peces. Juell en 1991 [7] desarrolló un método de detección acústica del pienso no ingerido acumulado y de los granos de pienso individuales, y Blyth en 1993 [8] utilizó la detección de *pellets* mediante sensores infrarrojos [2]. Posteriormente se desarrollaron *softwares* de análisis de imagen orientados a la detección y cuantificación del pienso sobrante [9] [10]. Además se han utilizado ecosondas en combinación con videocámaras, éstas últimas para determinar la posición de los individuos y la velocidad de natación, como indicativos de apetito. En 2003 Mallekh desarrolló un método de determinación del cese de suministro en cultivo de rodaballo mediante acústica pasiva, basado en los sonidos producidos por los individuos de esta especie durante la alimentación, un declive de los sonidos de alimentación es indicativo de saciedad, por lo tanto es posible conseguir un aporte óptimo de alimento para el crecimiento los individuos de cultivo [2]. Sin embargo este último método no es extrapolable a otras especies de interés puesto que es específico del rodaballo.

El propósito del presente estudio es la caracterización acústica de pienso comercial utilizado en acuicultura mediante la determinación del *target strength* (*TS*) de diferentes calibres de grano pienso.

Este trabajo supone la primera parte de un estudio cuyo objetivo es más ambicioso, el cuál consiste en diseñar un método capaz de determinar el momento en el que los individuos de una jaula marina han ingerido el alimento óptimo para su cultivo durante el proceso de alimentación mediante la detección de granos de pienso no ingeridos. De este modo se conseguiría minimizar los impactos económicos y ambientales consecuencia de un exceso en el suministro del alimento en jaulas submarinas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se procedió a la detección acústica de granos de pienso de 5calibres diferentes (1, 2, 4, 6 y 8 mm) mediante una ecosonda monohaz, ES15 *single-beam* de Simrad, en las aguas del puerto de Gandía. Esta ecosonda emite a una frecuencia de 200 kHz, la cual permite determinar el *TS* de los granos de pienso y la distancia de los mismos al transductor. Las medidas fueron realizadas teniendo en cuenta el haz acústico hasta una caída de intensidad de -3 dB, correspondiente a una apertura del haz de 30,3º.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros de las medidas con *single-beam*.

Tabla 1. Parámetros de la ecosonda ES15 *single-beam*.

| **Ecosonda ES15 *single-beam* de Simrad** | |
|---|---|
| Frecuencia | 200 kHz |
| Apertura del haz a -3 dB | 30,3º |
| Potencia | 90 W |
| Duración del pulso | 64 µs |
| Intervalo de muestreo | 0,012 s |
| Ancho de banda | 18,76 kHz |
| Frecuencia de absorción | 200 kHz |

Si el transductor se sitúa en superficie con orientación *top-down* los individuos pueden crear una "pantalla acústica" que dificulte la insonificación de los granos de pienso y no permitan la detección de los mismos. Por ello en el proceso de medición el transductor se situó en la parte inferior, a 2,5 metros de profundidad, con orientación *bottom-up*, de modo que detectara los *pellets* en descenso desde superficie, suministrados de manera manual en pequeñas cantidades.

Antes de proceder a la detección acústica del pienso se realizó una medición acústica en modo pasivo en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones que las mediciones experimentales, de modo que se tuvo un registro acústico del medio, necesario ante posibles anomalías que se pudieran presentar en los ecogramas.

El método de medida con una ecosonda monohaz presenta un inconvenientes: desviaciones de *TS*. El haz acústico es más intenso en el eje central con respecto a las zonas periféricas, es decir, los objetos que se encuentran cercanos al eje de propagación son insonificados con mayor intensidad, y por lo tanto un mismo objeto presentará mayor *TS* si se encuentra cercano al eje central que si se encuentra en zonas de menor intensidad del haz. Es por ello que se espera una variabilidad añadida por el método en los resultados de *TS* de los granos de pienso.

Se decidió trabajar con medidas de *TS promedio* y, además, con medidas de *TS máximo*. Con el propósito trabajar con las medidas que mitigaran en mayor medida las variaciones de *TS* debidas a la variación de intensidad en el haz acústico.

El procesado de datos se realizó mediante Sonar5-Pro y Matlab. En Sonar5-Pro se obtuvieron los datos de *TS* de los ecos de trazas individuales. El análisis en Matlab consistió en obtener, para cada calibre de pienso, los *TS* promedio (*TSp*) y los *TS* máximo (*TSm*) de las trazas y a partir de estos conjuntos de datos se obtuvo la media y el máximo del conjunto de los *TSp* de las trazas (<*TSp*> y *MTSp*, respectivamente) y lo mismo para el conjunto de *TSm* de las trazas (<*TSm*> y *MTSm*). En la Figura 1 se muestra el esquema del proceso.

Cabe indicar el *TS* promedio se calculó teniendo en cuenta que el *TS* es en escala logarítmica, puesto que son dBs. La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$TSp = 10\log(\Sigma TS) - 10\log(Necos) \qquad (1)$$

Se realizó un análisis de correlación lineal por mínimos cuadrados entre el calibre, en escala logarítmica en base 10 (*LogC*), y los datos de *TS* obtenidos.

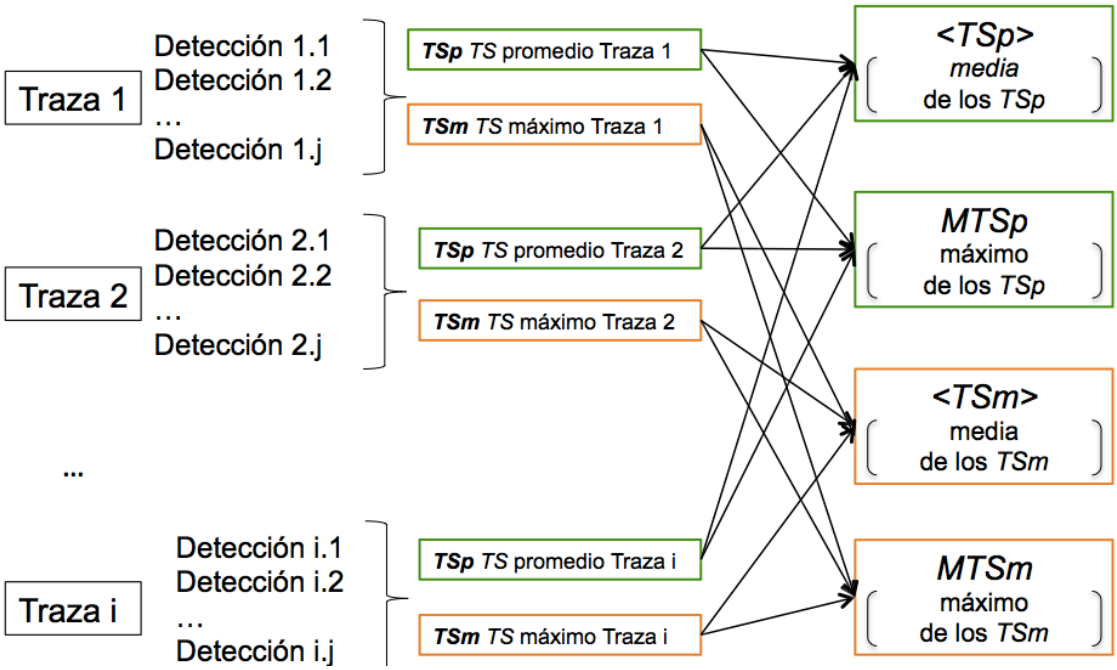



Figura 1. Esquema del procesado realizado sobre los datos de cada calibre sometido a estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante las medidas con *single-beam* a 200 kHz se ha podido determinar los TS de los 5 calibres de pienso sometidos a análisis.

En la tabla 2 se reflejan el número de trazas analizadas y los resultados de *TS* y desviación típica obtenidos para cada tipo.

Tabla 2. Resultados de cada calibre de granos de pienso: Número de trazas, *TS* (<*TSp*>, *MTSp*, <*TSm*> y *MTSm*) y desviación típica de los promedios y los máximos de *TS* de las trazas.

| Calibre (mm) | Nº de trazas | *TSp* de las trazas | | | *TSm* de las trazas | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *<TSp>* | *MTSp* | *σ* | *< TSm>* | *MTSm* | *σ* |
| 1 | 31 | -64,95 | -62,17 | 1,53 | -61,07 | -58,41 | 1,90 |
| 2 | 13 | -60,46 | -58,47 | 1,74 | -57,68 | -55,49 | 2,27 |
| 4 | 21 | -58,49 | -50,92 | 4,25 | -51,66 | -44,91 | 5,57 |
| 6 | 44 | -55,22 | -50,93 | 3,36 | -50,91 | -45,57 | 3,88 |
| 8 | 17 | -53,15 | -50,91 | 1,11 | -50,87 | -47,48 | 1,54 |

En la Figura 2 se muestran los histogramas de distribución de las medidas de *TSp* y *TSm* para cada tipo de pienso.

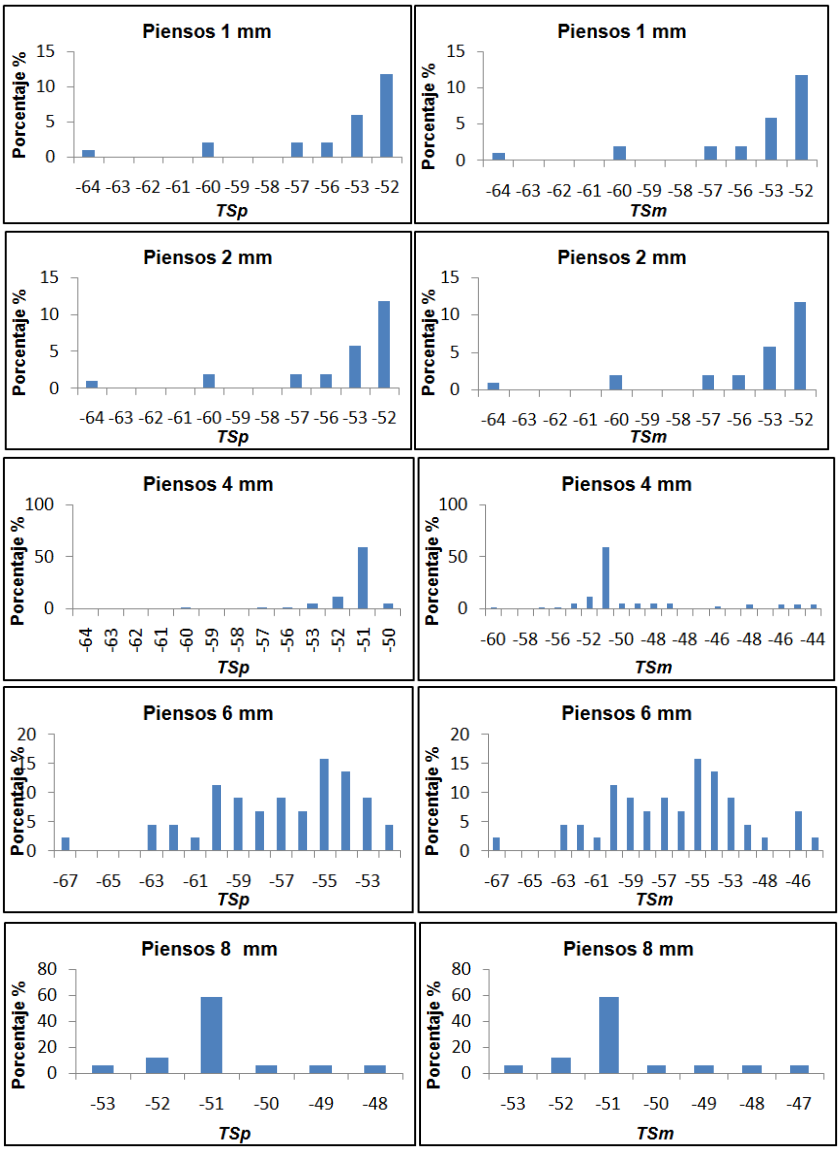



Figura 2. Histogramas de distribución de *TSp* y *TSm* en los calibres 1, 2 , 4, 6 y 8 mm.

Con el fin de asegurar que las trazas analizadas pertenecían a *pellets* individuales sólo se seleccionaron aquellas que tenían una longitud y una continuidad de ecos aceptable. Es por ello que en algunos casos, como es en el pienso de 2 mm de calibre, el número de trazas obtenidas no es elevado. Sin embargo presenta una desviación típica baja. No siendo así en el caso del pienso de 4 mm, que presenta una desviación mayor que el resto, tanto para los *TS* promedio de las trazas como para los *TS* máximos.

En todos los calibres la desviación típica de los datos es mayor cuando se ha utilizado los *TSm* de las trazas. Lo que era esperable puesto que los granos de pienso descienden verticalmente, debido a que el efecto de las corrientes de agua en la zona de medidas era mínimo. Los *pellets* que descienden cercanos al eje central del haz tendrán un *TSm* mayor que los *pellets* que descienden en la periferia. El *MTSm* debe ser el *TS* correspondiente al eco más cercano al eje de todos los ecos del muestreo de cada calibre.

En la Figura 3 se visualizan las 4 rectas de regresión lineal con la correspondiente ecuación de la recta y el coeficiente de correlación $R^2$. La gráfica *a* muestra la recta de regresión lineal entre el logaritmo del calibre (Log*C*) de los granos de pienso, como variable independiente, y la media de los *TSp* (<*TSp*>), como variable dependiente. La gráfica *b* refleja, de la misma manera, la recta de regresión lineal entre el logaritmo del calibre (Log*C*) y el máximo de los *TSp* (*MTSp*). Las gráficas *c* y *b* muestran las rectas de regresión lineal entre el logaritmo del calibre (*LogC*) de los granos de pienso y la media de los *TSm* (<*TSm*>) y entre el logaritmo del calibre y el máximo de los *TSm* (*MTSm*), respectivamente. Debido a la elevada desviación típica de los *TS* del pienso de calibre 4 mm, los puntos correspondientes al mismo se indican en blanco con el contorno negro, de modo que se identifiquen de manera sencilla.

En los 4 casos se muestra una correlación positiva entre el calibre de los granos y el *TS*, indicando, tal y como se esperaba, que la respuesta acústica es mayor cuanto mayor es el tamaño del grano. En todos los casos $R^2$ es mayor de 0,9 a excepción del M*TSm*. El mejor ajuste se da en la relación entre *LogC* y <*TSp*>, con una pendiente de 12,41 y un $R^2$ de 0,977.

Dado que el calibre de 4 mm es el que ha tenido una mayor desviación típica, se ha procedido a calcular el ajuste lineal entre *LogC* y <*T*Sp> sin tener en cuenta dicho calibre. La ecuación de la recta resultante es la siguiente: <TSp> = 12,61*LogC*-64,7; y el coeficiente de regresión lineal: $R^2$ = 0,99. Se ha podido comprobar que el ajuste, ya siendo bueno, mejora. Sería óptimo poder incluir una medida del calibre 4 mm con mayor exactitud.

Se puede inferir que existe una relación lineal entre el calibre de los granos de pienso y el *TS*. La mayor correlación se da entre el calibre en escala logarítmica y el la media de los *TS* promedio de las trazas.

Cabe indicar que estos resultados se han obtenido de detecciones de los piensos bajo condiciones similares a "jaulas vacías" o con muy baja densidad de individuos, sin embargo no son las condiciones de producción. En estas últimas habría una elevada densidad de individuos en el campo insonificado, de modo que los ecogramas presentarían mayor ruido. Si bien es cierto que el *TS* de los peces de cultivo, como la dorada con un TS mayor de -42 dBs [11], son mayores que el *TS* de los granos de pienso, y además las trayectoria de las trazas también son notablemente diferentes, por lo tanto la discriminación entre los *pellets* y los individuos sería relativamente sencilla. Por otra parte, en condiciones de producción el transductor se encontraría a una profundidad mayor y los granos de pienso a medida que descienden varían su densidad, puesto que el aire que contienen es sustituido por agua, lo cual modificaría su *TS*. En el presente estudio los granos se suministraron en seco, y se detectaron hasta que descendieron unos 4 m de profundidad. Por este motivo sería interesante realizar el estudio con piensos de características similares a piensos que ya han descendido varios metros de profundidad, acercando las condiciones de estudio a condiciones de producción.

Para mitigar las variaciones de *TS* introducidas por el método de medida con *single-beam* están en marcha estudios de detección con *split-be*am (a 200 kHz y a 120 kHz). Con estas ecosondas es posible compensar esa desviación de *TS* ya que se conoce la posición angular de los objetos dentro del haz. Esta nueva línea de investigación incluye la detección de piensos suministrados en seco y la detección de piensos suministrados ya húmedos, simulando estos últimos las características de los piensos detectados a mayores profundidades.

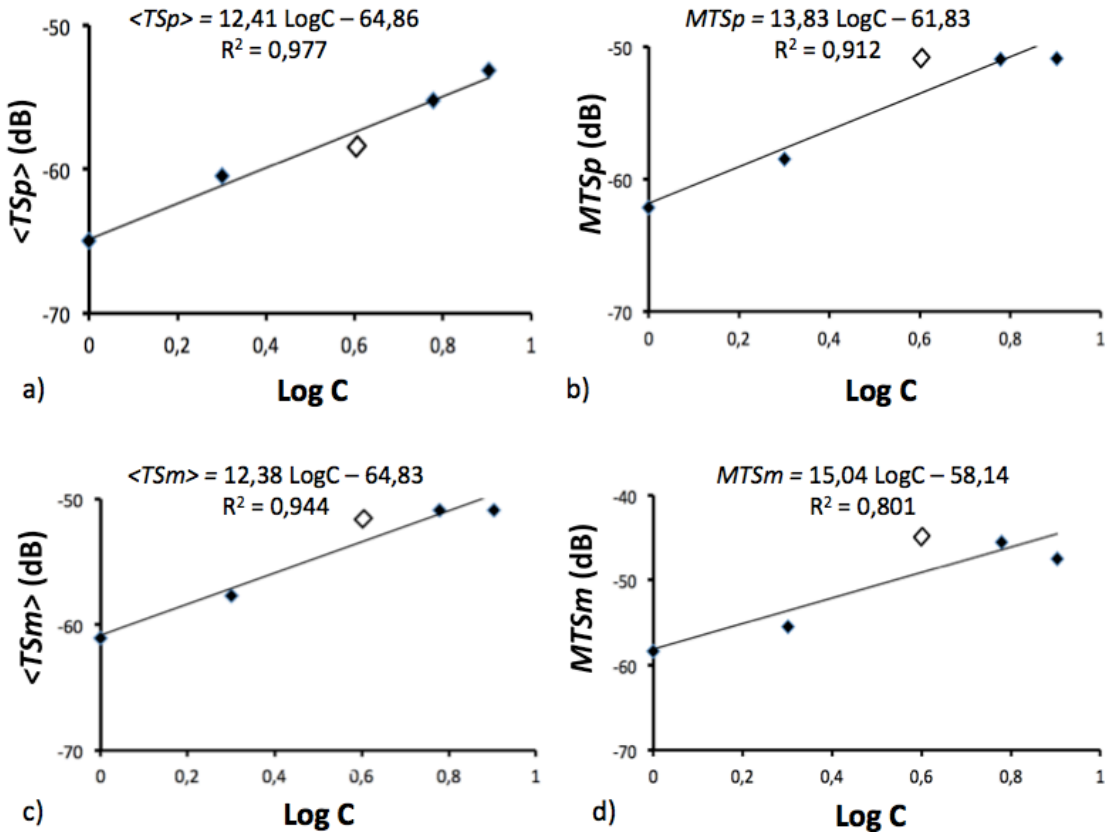



Figura 3. Rectas de regresión lineal entre el calibre (en escala logarítmica) de los granos de pienso y el TS (<*TSp*>, M*TSp*, <*TSm*> y M*TSm*).

## CONCLUSIÓN

Existe una relación lineal entre el calibre del grano de pienso y el *target strength*. Lo cual deja una línea de investigación abierta al desarrollo de un método de detección de granos de pienso en descenso, mediante determinación del *target strength,* en condiciones de producción con el fin de disminuir los perjuicios económicos y ambientales ocasionados por el exceso de suministro de alimento en acuicultura marina. Si bien es cierto que es conveniente llevar a cabo estudios de caracterización acústica de piensos con ecosondas *split-beam* con el objetivo de complementar la presente investigación.

## REFERENCIAS

[1] Acker, T., Burczynski, J., Hedgepeth, J.,Ebrahim, A. (2002). Digital Scanning Sonar for Fish Feeding Monitoring in Aquaculture.*Biosonics Inc.,* http://www.biosonicsinc.com.

[2] Mallekh, R., Lagardere, J. P., Eneau, J. P., Cloutour, C. (2003). An acoustic detector of turbot feeding activity.*Aquaculture*, *221*(1), 481-489.

[3] García, M., Sendra, S., Lloret, G., Lloret, J. (2011).Monitoring and control sensor system for fish feeding in marine fish farms.*IET Communications*, 5(12), 1682-1690.

[4] Pearson, G. (1991). Eutrophication resulting from salmonid fish culture in fresh and swaters: Scandinavian experiences.*Nutritional strategies and aquaculture waster*, 163-185.

[5] Helland, S. J., Grisdale-Helland, B., Nerland, S. (1996). A simple method for the measurement of daily feed intake of groups of fish in tanks.*Aquaculture*, *139*(1), 157-163.

[6] Alanärä, A., Kadri, S., Paspatis, M. (2001). Feeding management. *Food Intake in Fish*, 332–353.

[7] Juell, J. E. (1991). Hydroacoustic detection of food waste—a method to estimate maximum food intake of fish populations in sea cages. *Aquacultural engineering*, *10*(3), 207-217.

[8] Blyth, P.J., Purser, G.J., (1993). Detection of feeding rhythms in sea caged Atlantic salmon using new feeder technology. *Fish Farming Technology*. 209-216.

[9] Foster, M., Petrell, R., Ito, M. R., Ward, R. (1995). Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis. *Aquacultural Engineering*, *14*(3), 251-269.

[10] Ang, K. P., Petrell, R. J. (1997). Control of feed dispensation in sea cage using underwater video monitoring: effects on growth and food conversion. *Aquacultural Engineering*, *16*(1), 45-62.

[11] Soliveres, E., Cebrecos, A., & Espinosa, V. (2012).Dorsal and ventral target strength measurements on gilthead sea bream (Sparusaurata) in sea cages. *arXiv preprint arXiv:1201.4696*.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ESTIMATION OF TS AND ACOUSTIC DISCRIMINATION OF SKIJPACK TUNA AROUND FADS

**PACS:** 43.30.Vh Sistemas de sonar activo

Guillermo Boyra; Gala Moreno
AZTI-Tecnalia; Marine Research Division; Herrera Kaia z/g; 20110 Pasaia (Spain). Tel: (+34) 667174453 Fax: (+34) 946572555

## ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the acoustic response properties of the main species of tuna found in tropical waters from data collected around drifting Fish Aggreggating Devices (FAD). This analysis has a double objective. On one hand the determination of the in situ target strength (TS) allows the conversion of acoustic backscattering to abundance estimations. On the other hand, the comparison of acoustic backscattering at different frequencies provides the acoustic frequency response characteristic of each species, which can be used to distinguish between species based on purely acoustic methods.

## RESUMEN

El objeto de este trabajo es analizar las propiedades de respuesta acústica (es decir TS o "target strength") de las principales especies de túnidos presentes en aguas tropicales, a partir de datos acústicos registrados en las inmediaciones de DCPs (Dispositivos Concentradores de Peces). Este análisis persigue un doble objetivo. Por un lado la determinación *in situ* del TS permite convertir los registros de retro-dispersión acústica en estimaciones de abundancia. Y, por otro, la comparación de valores de TS a distintas frecuencias, proporciona la respuesta en frecuencia característica de cada especie, que puede emplearse para distinguir entre especies a partir de métodos puramente acústicos.

## INTRODUCTION

The target strength (TS) value is a chief magnitude in fisheries acoustics used to convert acoustic data into biological units such as abundance. Hence, knowledge about individual TS is an essential requirement for scientists to obtain accurate assessment of fish biomass and fish behavior. For other users, as fishers, TS values can help to discriminate species composition before fishing, thus increasing the selectivity of the fishery.

Tropical tunas are caught at FADs, where the main target species is skipjack tuna (*Katsowonus pelamis*), which is most of the time found, at different proportions, together with 2 other juvenile tuna species, bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). Skipjack stocks contribute more than one half of the global catch of tunas and they are all in a healthy situation. However, recent stock assessments for bigeye tuna indicate that overfishing is occurring for this species in Pacific Ocean. About 58 percent of the world production of tuna is

from the western and central Pacific Ocean. For these reasons, taking action to avoid catching undesired tuna species around FADs is of most importance for the sustainability of this fishery.

Tropical tuna purse seiners have scientific-degree acoustic equipment, sonars, echo-sounders and echo-sounder-buoys that are used when searching for and fishing tunas (Fig 1). However, the capability of fishers and scientists to discriminate these 3 tuna species (skipjack, small bigeye and small yellowfin tunas) at FADs is nowadays very low. One possible way to discriminate between tuna species is by knowing the TS of each species and, specially, making use of possible difference in frequency response of the different species, if any.

In the case of the species of tunas caught around FADs in the Pacific Ocean, two of the species (bigeye and yellowfin) have a swimbladder, whereas the third one (skipjack) lacks this organ. Given that the highest contribution to the TS is given by the swimbladder, there is normally a contrasting different frequency response between swimbladdered and non-swimbladdered species. This is a potential source of discrimination between species that has been applied in other cases, for example Norwegian mackerel (Korneliussen, 2010), and could be applied to distinguish skipjack from bigeye and yellowfin.

Unfortunately, TS values for tropical tuna are scarce, few studies have analyzed TS on aggregations around FADs (Doray *et al.*, 2006; Josse and Bertrand, 2000; Moreno *et al.*, 2008). *In situ* TS measurements for bigeye and yellowfin tunas were obtained by Bertrand and Josse (2000) and (Bertrand *et al.*, 1999), but these observations were insufficient to establish a reliable relationship between tuna length and TS. For skipjack tuna there is currently no *in situ* TS observations but *ex situ* observations made by (Oshima, 2008).

This paper presents first *in situ* TS values for skipjack tuna observed at FADs in the Pacific Ocean at three frequencies (38, 120 and 200 kHz) with the aim of working towards acoustic selectivity of the different tuna species found at FADs.

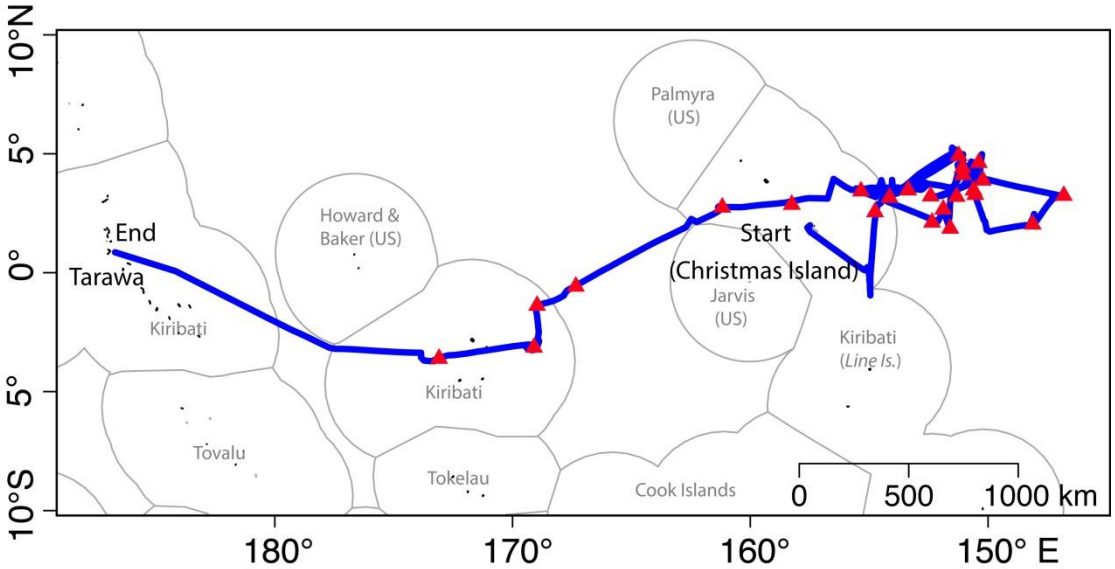



Figure 1. Map of cruise track (blue line) and set locations (red triangles) aboard the F/V ALBATUN TRES.

## MATERIAL AND METHODS

### Data Collection

A scientific acoustic equipment was carried onboard a commercial tuna fishing cruise in the central Pacific Ocean. The cruise took place for one month in May 2014 onboard the purse seiner F/V ALBATUN TRES, a 115 m Spanish purse seiner built in 2004 with 4,406 GT (2,260 tons carrying capacity). The cruise started in Christmas (Kiribati Is.) on May 3rd and ended in Tarawa (Kiribati Is.) on May 31st (**Figure 1**). The activity included daily purse seines around drifting FADs (Figure 2), followed by intensive spill sampling to compare acoustic data and species composition. In total, 27 sets were made, 26 of which were on drifting FADs (dFADs), and one on a free school.

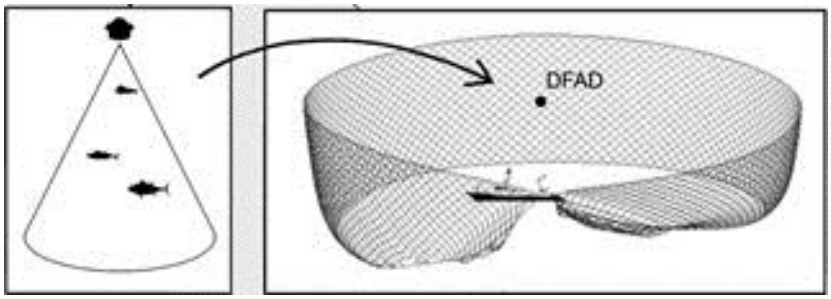


Figure 2. Conceptual drawing of the purse seine fishery operation around dFADs.

A split-beam acoustic echo-sounder Simrad EK60 of frequencies 38, 120 and 200 kHz was installed onboard the “panguita” (one of the small work boats onboard the purse seiner, Figure 3). The system was installed about 1 m depth. The main acoustic parameters were: pulse duration 512 us, ping rate of around 0.25 s and power of 1200, 200 and 90 Watts for the 38, 120 and 200 kHz respectively. The data were recorded down to 200 m depth. The acoustic equipment was calibrated following the methodology of Foote (1987) using a single tungsten carbide sphere of 38.1 mm for the three frequencies, using a nominal TS value for the sphere of -42.3, -40.0 and -39.9 dB for 38, 120 and 200 kHz respectively (Simmonds and Maclennan, 2005). During the cruise, the acoustics was used in 20 of the 27 sets. In each of these sets, the panguita was attached to the dFAD starting about 10 minutes before the set and remained attached during the purse seine set. During these minutes, lights were off but, after that, the panguita focused bright light to the water to attract the tuna aggregation just before the start of the purse seine operation. In the first part of the operation, the panguita drifted with the dFAD and, afterwards, it moved slowly to keep the dFAD separated from both the net boundaries and the purse seiner. The transducers were focused vertically downwards, to acoustically sample the fish aggregation. In each set, around 60 to 70 minutes of acoustic data were recorded, with approximately 75% of the pings successfully detecting the tuna aggregation. Normally, we obtained about 10 minutes of recordings without light and about 1 hour of recording with light.

### Data Analysis

Spill sampling of the catch was done in each set at which acoustic EK60 data was recorded, in order to obtain the species and size composition of the catch that allows the conversion of acoustic backscatter into skipjack, bigeye and yellowfin abundances. Between 1 and 2 tons of fish were measured in each of these sets using a fiberglass box of dimensions 110cm x 70cm x 100cm (approximately 0.8 ton capacity). Spill samples were selected randomly during each set to avoid bias. In general, samples were taken every 6th or 7th brail, which provided enough time

for the entire sample to be processed before the next sample was chosen. Scientists identified species and measured each fish in the sample to the nearest centimeter on flat measuring boards. The weights of sampled individuals were estimated using length-weight relationships available for each species. These proportions by weight were then extrapolated to the total tonnage of each set, as estimated by the fishing master. The sets with more than 90 % of skipjack were selected for acoustic analysis in order to extract its TS-length relationship and acoustic frequency response characteristics.



Figure 3. Scientific echo-sounders installed on the work boat ("panguita").

The Simrad EK60 acoustic data were backed up and then pre-processed using Echoview (Myriax inc.). The pre-processing included the following steps: (i) Draw upper and lower (200 m or net) exclusion lines (ii) Spikes (interferences) filtering and (iii) Wave-induced gap filtering.

A *Resonant Scatterers Filter* (RSF) was applied to remove the resonant scatterers layers of the echograms. The filter is a mask, i.e., a matrix bitmap with the same dimension (number of rows and columns) as the acoustic echograms, which works by blocking the “pixels” (or acoustic samples) that have a backscattering value below a threshold of -65 dB. The cells of the mask have a value of 1 if the corresponding pixel at any of the frequencies of the $s_v$ echogram is higher than the threshold and a 0 value if it is lower than the threshold. The idea is that only the pixels with high values in all the frequencies simultaneously (typically fish) will pass the filter. The pixels that have low values in all the frequencies or have high values in only one of the echograms (i.e., the “resonant” layers; typically plankton) will be removed. The same filter was applied to the TS echograms of the three frequencies (38, 120 and 200 kHz).

The single target detection filter for split beam echosounder in Echoview (Myriax, inc.) was applied, followed by a stochastic TS analysis. A variation of the method proposed by MacLennan and Menz (1996) was applied for matching the TS distributions and fish size histograms to determine the TS-length relationship, but assuming a normal (instead a Rayleigh) scattering distribution for the TS values. The TS-L relationships were estimated with the light of the panguita on and off (with and without light). A slope of 20 was assumed in the TS-length relationship:

$$TS = 20 \log(L) + b_{20},$$

being L the fish body length in cm.

## RESULTS

Sets number 24, 26 and 27 had a percentage of skipjack above 90% and were selected for the acoustic analysis. An example of the result of the application of the RSF on the echograms of set 24 is shown in Figure 4. The left panels show the raw $s_v$ echograms at the three

frequencies, showing a resonant scatterer layer below the skipjack aggregation. The center panels show the $s_v$ echograms filtered with the RSF with the threshold at -65 dB, removing the resonant scatterers (plankton) layer. The right panels show the RSF-filtered single target TS echogram effectively removing the single targets from the plankton layer.

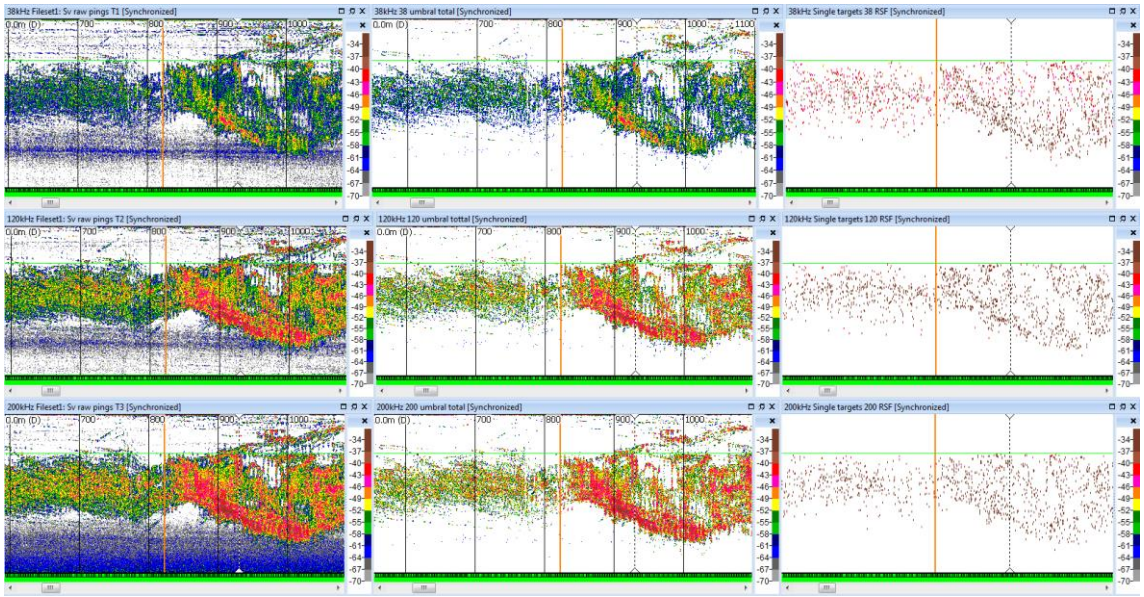


Figure 4. Echogram example corresponding to set number 24.

The single target detection algorithm was applied on the single target filtered TS echograms with and without RSF. The RSF was able to effectively remove the plankton, thus extracting monomodal *in situ* TS distributions from overlapping multimodal ones (Figure 5). The RSF showed an improved performance over the "classic" single frequency threshold filter, that is only able to cut each distribution at a given TS value, distorting the distribution fish TS without being able to completely remove the plankton TS values.

The match of the expected versus observed single target TS distributions provided good agreement (Figure 6, with coefficient of determinations between 67 and 92 % (Table 1). The average TS-length relationships for skipjack and for the three frequencies are shown below.

With light:

$$TS38 = 20 \log(L) - 69.49$$
$$TS120 = 20 \log(L) - 62.76$$
$$TS200 = 20 \log(L) - 60.85$$

Without light:

$$TS38 = 20 \log(L) - 73.95$$
$$TS120 = 20 \log(L) - 67.65$$
$$TS200 = 20 \log(L) - 65.82$$

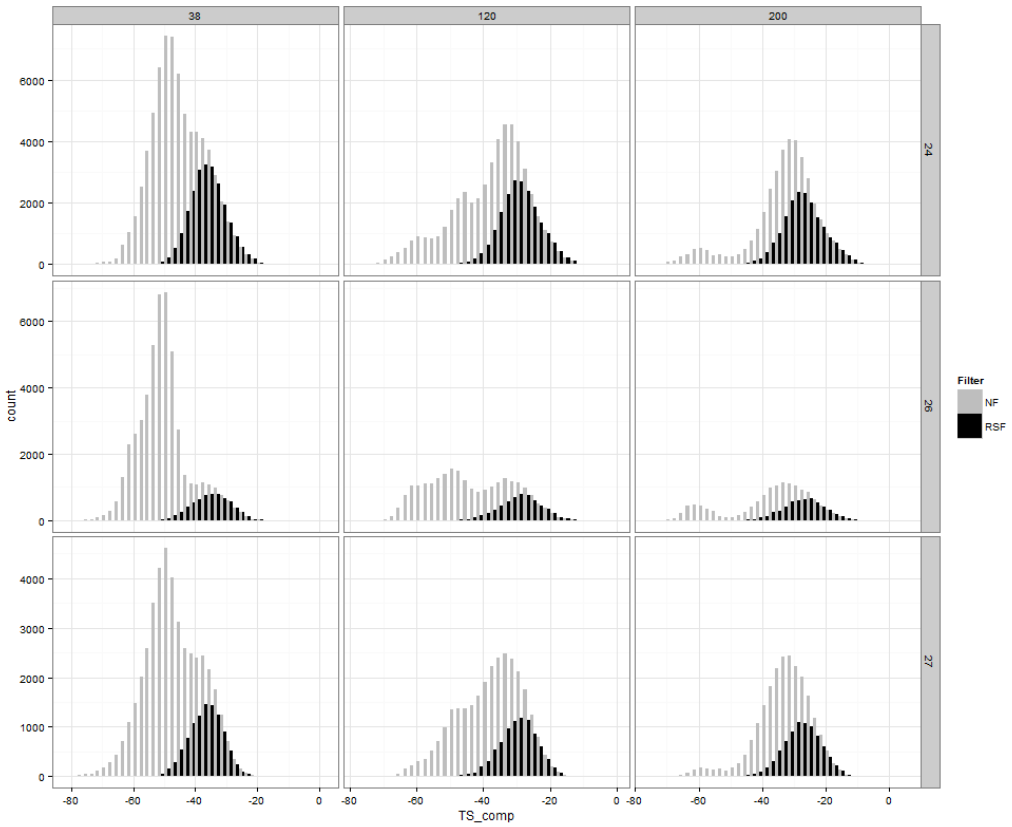



Figure 5. Comparison of the histograms of the distribution of in situ TS values with (RSF) and without (NF) Resonant Scatterer Filtering per set and frequency.

Table 1. Optimized b20 values per set and light conditions.

| set | light | freq | b20 | sd | R2 |
|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 1 | 38 | 69.5 | 5 | 89.8 |
| 24 | 1 | 120 | 62.4 | 5 | 87.0 |
| 24 | 1 | 200 | 60.6 | 5 | 78.7 |
| 26 | 1 | 38 | 69.1 | 5 | 75.4 |
| 26 | 1 | 120 | 63.1 | 5 | 82.1 |
| 26 | 1 | 200 | 61.3 | 5 | 75.0 |
| 27 | 1 | 38 | 69.8 | 5 | 92.3 |
| 27 | 1 | 120 | 62.8 | 5 | 89.3 |
| 27 | 1 | 200 | 60.7 | 5 | 89.2 |
| 24 | 0 | 38 | 73.1 | 3 | 83.3 |
| 24 | 0 | 120 | 66.5 | 3 | 81.8 |
| 24 | 0 | 200 | 64.7 | 3 | 83.8 |
| 27 | 0 | 38 | 75 | 3 | 67.4 |
| 27 | 0 | 120 | 68.9 | 3 | 75.7 |
| 27 | 0 | 200 | 67.1 | 3 | 73.8 |

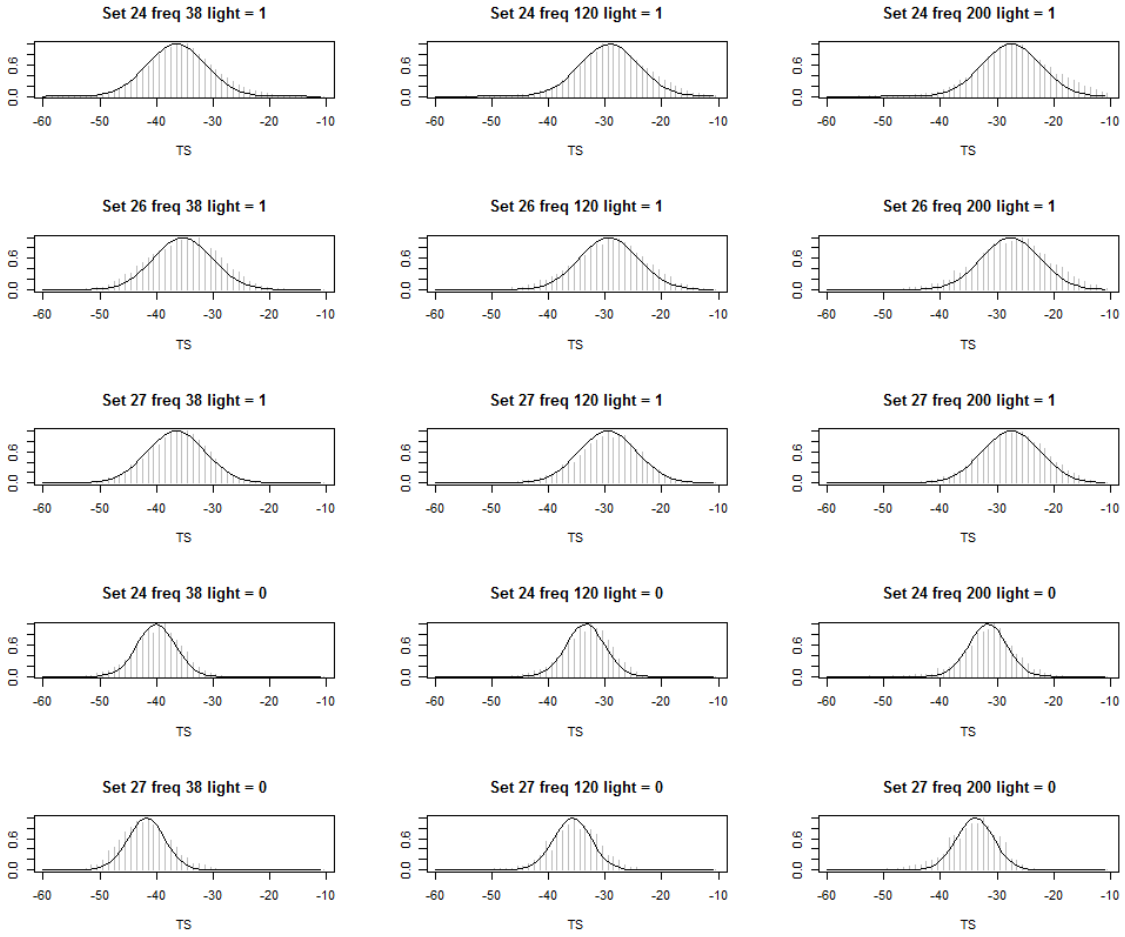



Figure 6. Expected (black line) versus observed (vertical grey bars) TS values for each set and light condition. The expected distributions were obtained by optimization of the TS-length relationship. The width of the gaussians were fixed at 5 dB for light = 1 and 3 dB for light = 0.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the following organizations and people for their invaluable assistance in completing this work: First, to Kiribati, Tuvalu and Tokelau on whose EEZs the vessel was licensed for their consent to carry out research. We would also like to thank the fishing master Euken Mujika, the captain and the entire crew of the F/V ALBATUN TRES, as well as the Albacora company for allowing us to use their vessel crew assistance to us for this work. Finally, we would like to thank the ISSF for financial and logistical support of this cruise.

## REFERENCES

Bertrand, A., and Josse, E. 2000. Tuna target-strength related to fish length and swimbladder volume. ICES Journal of Marine Science, 57: 1143–1146. http://icesjms.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1006/jmsc.2000.0881.

Bertrand, A., Josse, E., and Massé, J. 1999. Preliminary results of acoustic target strength measurements of bigeye (Thunnus obesus) and yellowfin tuna (Thunnus albacares). *In* Proc. 5th Indo-Pac. Fish Conj., pp. 443–450.

Doray, M., Josse, E., Gervain, P., Reynal, L., and Chantrel, J. 2006. Acoustic characterisation of pelagic fish aggregations around moored fish aggregating devices in Martinique (Lesser Antilles). Fisheries Research, 82: 162–175. Elsevier. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165783606002414.

Foote, K. 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. International Council for the Exploration of the Sea. 81 pp. http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Calibration+of+acoustic+instruments+for+fish+density+estimation:+a+practical+guide#0.

Josse, E., and Bertrand, A. 2000. In situ acoustic target strength measurements of tuna associated with a fish aggregating device. ICES J. Mar. Sci, 57: 911–918.

Korneliussen, R. 2010. The acoustic identification of Atlantic mackerel. ICES Journal of Marine Science, 67: 1749–1758. http://icesjms.oxfordjournals.org/content/67/8/1749.short.

MacLennan, D., and Menz, A. 1996. Interpretation of in situ target-strength data. ICES Journal of Marine Science, 53: 233. http://icesjms.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/53/2/233.

Moreno, G., Josse, E., Brehmer, P., Nøttestad, L., and Us, C. D. B. 2008. Echotrace classification and spatial distribution of pelagic fish aggregations around drifting fish aggregating devices ( DFAD ). Aquatic Living Resources, 356: 343–356.

Oshima, T. 2008. Target strength of Bigeye, Yellowfin and Skipjack measured by split beam echo sounder in a cage. IOTC, WPTT-22: 4.

Simmonds, J. E., and Maclennan, D. N. 2005. Fisheries Acoustics Theory and Practice. Second Edition. Chapman & Hall, New York: 472pp.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# EVALUACIÓN DEL TARGET STREGTH DE JUVENILES DE ATÚN ROJO (*THUNNUS THYNNUS*) EN JAULAS MARINAS.

PACS: 43.30.-k

Vicente Puig[1], Ester Soliveres[1], Patricia Ordoñez[1], Víctor Espinosa[1], Isabel Perez[1], Fernando de la Gándara[2], Vicent Estruch[1], Lucio Calise[3].

[1] I.G.I.C. (Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras) – Universitat Politècnica de Valencia, C/ Paranimf, 1 46730 Grao de Gandía (Valencia - Spain)

[2] IEO (Instituto Español de Oceanografía) Centro Oceanográfico de Murcia. Planta de Cultivos Marinos, Ctra. de la Azohia s/n 30860 - Puerto de Mazarrón (Murcia-Spain)

[3] ZUNIBAL S.L. Idorsolo, 1 – 48160 Derio (Bilbao-Spain)

vipuipon@epsg.upv.es, vespinos@fis.upv.es, essogon@epsg.upv.es, fernando.delagandara@mu.ieo.es

**Abstract**

In recent years, the Spanish Institute of Oceanography (IEO) has maximized its efforts on developing mechanisms for the breeding of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*), whose complete cycle is near to be closed. In this paper, acoustic measurements performed on young tuna cages (with scientific echosounder and split-beam transducer) are presented. Tuna housed in the cages were born in captivity and they are divided in three cages according to their size. The combination of the acoustic and biometric data (obtained with stereoscopic system) allow to establish a relationship between representative tuna length in each cage and the target strength (TS).

**Resumen**

En los últimos años, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) ha maximizado sus esfuerzos en desarrollar mecanismos para la cría en cautividad del atún rojo (*Thunnus thynnus*), cuyo ciclo completo está a punto de cerrarse. Este trabajo presenta los resultados obtenidos tras realizar mediciones acústicas con una ecosonda científica y un transductor *split-beam* en jaulas marinas donde los atunes, nacidos en cautividad, se separan en tres tamaños. La combinación de los datos acústicos y de los muestreos biométricos (obtenidos ópticamente) permite establecer una relación entre la longitud de los peces y el valor del target stregth (*TS*) devuelto por dichos peces.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está desarrollando una incipiente industria acuícola del atún rojo (*Thunnus thynnus*) que implica la obtención de huevos fértiles a partir de reproductores ubicados en jaulas flotantes, el cultivo larvario y la producción de juveniles en instalaciones en tierra, y el posterior engorde de los mismos, nuevamente en jaulas. A este respecto, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) lleva varios años produciendo juveniles de esta especie con el

objetivo de cerrar su ciclo biológico en cautividad y contribuir al desarrollo de la producción de atún rojo mediante técnicas de acuicultura integral [1,2].

Las técnicas acústicas se han revelado como una tecnología versátil y prometedora para la monitorización del crecimiento de peces en jaulas. Para poder controlar el proceso de crecimiento de manera adecuada, es necesario establecer una relación precisa entre el tamaño del pez y la potencia acústica retropropagada por el mismo, también llamada potencia del blanco o target strength (TS). Algunos estudios realizados con salmones [3] han mostrado la posibilidad de establecer una correlación entre el tamaño de los peces y el TS de los mismos, abriendo las puertas a estudios similares con otras especies.

Actualmente están en desarrollo trabajos con especies como la dorada o la lubina [4], de alto impacto económico por su elevado consumo a nivel mundial. La producción de estas especies en piscifactorías ha aumentado de manera notable en los últimos años, superando incluso en toneladas a las capturas, por ello, el uso de herramientas de control de la producción se hace cada vez más indispensable.

Para el caso del atún rojo no se conocen estudios de estas características, sin embargo si se han realizado campañas de medida del TS para otras especies similares como el bigeye tuna o patudo (*Thunnus obesus*) o el atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*) principalmente del aspecto dorsal del TS medido *in situ* [5]. No obstante, en ningún caso se conocen medidas realizadas en jaulas de engorde para ninguna de estas especies ni para el atún rojo.

En este trabajo se pretende estudiar si es posible establecer una relación entre el tamaño de atunes juveniles nacidos en cautividad y el TS, realizando medidas desde la superficie (aspecto dorsal), ya que, anteriores experiencias con atunes en cautividad de mayor tamaño [6], mostraron que dicha correlación existe realizando las medidas desde el fondo de la jaula (aspecto ventral), como indican los principales trabajos publicados sobre este tema [3]. La diferencia entre las medidas realizadas dorsal y ventralmente pueden ser debidas a la cortas distancias de medida, ya que, no nos encontraremos dentro del llamado “campo lejano” del sonido, que depende del tamaño del pez.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Medidas Experimentales

Se realizaron medidas en tres jaulas localizadas en El Gorguel (Murcia) y gestionadas por la empresa Fortuna Mare. En dichas jaulas se alojaban atunes juveniles separados por tamaño. Todos los atunes estudiados habían nacido en cautividad, y forman parte de los estudios que el Instituto Español de Oceanografía lleva a cabo con la finalidad de cerrar el ciclo vital para esta especie.

Se eligieron las jaulas J2, J3 y J5 que contenían atunes de diferentes tamaños estando los de mayor tamaño en la J2, los de tamaño intermedio en la J3 y los de menor tamaño en la J5. Las jaulas tenían un diámetro de 25 metros y una profundidad de 16 metros las que alojan peces de mayor tamaño y de 10 metros la que contenía a los atunes más pequeños.

Las medidas se realizaron desde la superficie para evaluar el TS de manera dorsal. Se utilizaron dos ecosondas científicas EK60 de Simrad trabajando de manera síncrona, una conectada a un transductor split-beam de 200 KHz y la otra a un transductor split-beam de 120 KHz, ambos transductores con 7º de apertura. Los transductores se colocaron a la mitad del radio de la jaula, orientados hacia el fondo de la misma y con la mínima separación posible entre ambos. La potencia transmitida es de 90 W para la frecuencia de 200 KHz y de 100 W para la de 120 KHz, la duración del pulso transmitido es de 64 µs a las dos frecuencias, así

como el intervalo entre pings que es el máximo a ambas frecuencias. Las medidas cada jaula se realizan durante una hora y media.

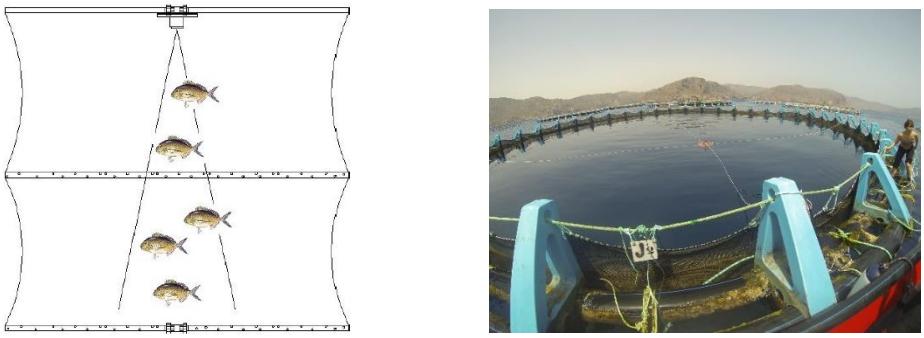


Fig. 1. A la izquierda esquema de medidas dorsales en una jaula. A la derecha imagen de los transductores colocados en la jaula J2

Para disponer de información biométrica de los atunes de cada jaula, se realizan grabaciones con un sistema de cámaras estereoscópicas (Vicass System de AkvaSmart). Este sistema ha sido diseñado para realizar mediciones de longitud de los peces en jaulas, y se usa normalmente por los productores para conocer el tamaño promedio dentro de las jaulas. El sistema óptico está compuesto por dos cámaras idénticas montadas en una caja de metal estanca y con sus ejes ópticos alineados y separados 15 pulgadas. Dicho sistema dispone además de un ordenador de campo que nos permite la manipulación de las cámaras y la obtención de imágenes de manera manual o automática.



Fig. 2. Imagen del sistema estereoscópico antes de sumergirlo (izquierda). Imagen del sistema de cámaras estereoscópicas realizando mediciones en una de las jaulas (derecha).

## Análisis De Los Datos

Los datos obtenidos del sistema óptico se analizan con ayuda de un software específico que proporciona el fabricante para su análisis. Para realizarlos debe medirse todos los ejemplares posibles en cada par de imágenes captado por las cámaras, marcando la nariz y la cola de

cada pez (obteniendo así la conocida como longitud furcal), y la altura máxima de cada pez. Este software nos ofrece distribuciones de tamaño para cada jaula analizada.

Los datos acústicos se analizan en dos pasos. En el primer paso los datos son tratados con ayuda del software Sonar5 Pro, ya que, se detectan en los ecogramas varias especies: atunes lachas y obladas. Por ello, los ecogramas deben ser limpiados para su correcto procesado. Una vez limpios se aplica un proceso de detección de ecos simples (SED) para obtener ecos individuales procedentes de un único pez [6]. Finalmente los datos de los ecogramas limpios, y los resultantes del procesado SED son exportados en formato de texto para su posterior tratamiento en Matlab ®.

En el procesado SED, se consideran detecciones de ecos individuales aquellas con un valor superior a -100 dB, para una longitud de pulso entre 0.4 y 4.0 relativa al ancho del pulso emitido, una compensación de ganancia máxima en una dirección de 12 dB, y una desviación de fase máxima de 3.

Se dispone de una herramienta implementada en Matlab ® que permite la detección de trazas individuales. Permite que dichas trazas sean aisladas y se puedan extraer diferentes parámetros de las mismas. Para nuestro análisis de cada traza se extrae el valor del TS máximo (TSmax) para el ecograma limpio, y el valor del TS máximo compensado (TScmax) y sin compensar (TSumax) para el ecograma limpio y procesado con el detector de ecos simples. Cuando se habla de TS sin compensar, se hace referencia a que el valor del TS no ha sido corregido cuando éste proviene de cualquier punto del haz acústico fuera del eje de máxima radiación y por lo tanto no existe compensación de fase, como ocurre con los transductores de haz único o single beam. Por el contrario, el TS compensado es aquel que sí es corregido cuando es detectado fuera del eje acústico del transductor (compensado su fase), y solo es posible obtenerlo en transductores de haz dividido o split beam. Durante el análisis para eliminar detecciones e bajo nivel se elige un nuevo umbral de – 60 dB, y se eliminan el primer metro desde la superficie del transductor y las detecciones pegadas al fondo de la jaula.

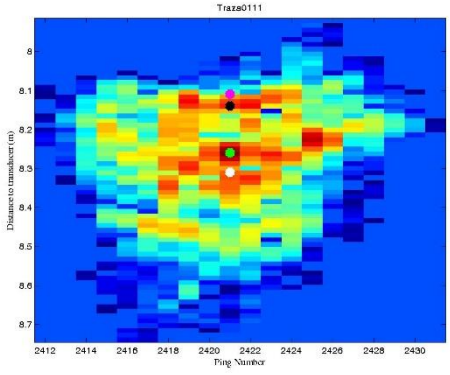



Fig.3- Traza aislada del ecograma limpio sin aplicar SED

Los datos acústicos ofrecen distribuciones del TS para cada una las modalidades de TS consideradas (el TS máximo, TS máximo sin compensar y TS máximo compensado). De estas distribuciones se extraen indicadores estadísticos de manera que se obtiene para cada jaula el valor de la media, la mediana y la moda para cada una de las modalidades del TS. Por último se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para hallar la relación entre el TS y el logaritmo de la longitud del pez.

## RESULTADOS

Del análisis de los datos ópticos se extrae la distribución de tamaños para cada jaula, que se puede verse en la Fig. 4. Obteniéndose tamaños medios para la jaula 2 (J2) de 102.34 cm, de 71.76 cm para la jaula 3 (J3) y de 53.29 cm para la jaula 5 (J5).

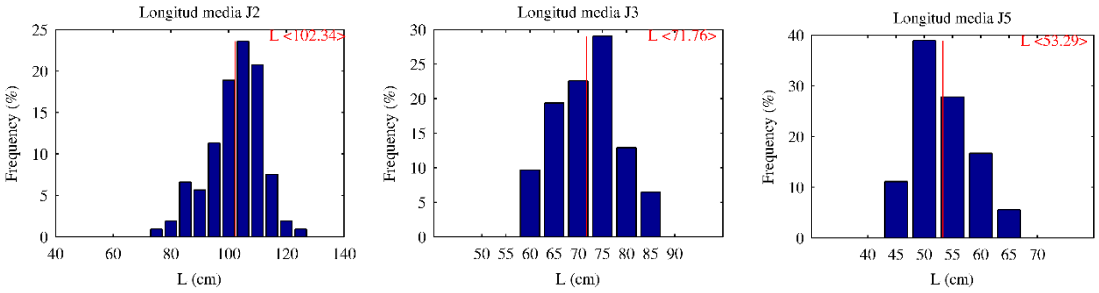



Fig. 4.- Distribución de longitudes para las jaulas J2, J3 y J5 (de izquierda a derecha).

La Fig.5 muestra la distribución de TS para la jaula 2, la que contiene atunes de mayor tamaño, para las dos frecuencias (120 y 200 KHz). En ambos casos las distribuciones tienen carácter unimodal. Para los peces de tamaño mediano esta característica se mantiene en las distribuciones, ocurriendo lo mismo para la jaula 5, aunque de manera menos clara. Hay que destacar que en el caso de la J2 y la J3 el número de detecciones es mucho mayor que para la J5 (hasta 4 veces más). Esta disminución de detecciones se debe principalmente a la presencia de menor cantidad de ejemplares y por tanto a la disminución de la probabilidad de que los atunes crucen el haz acústico.

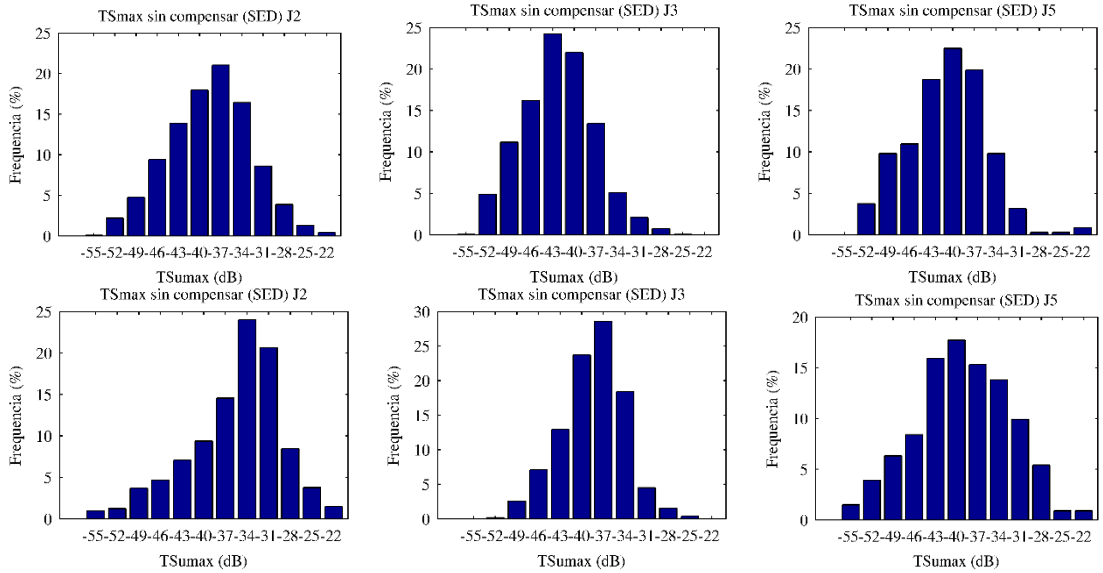



Fig. 5.- En la parte superior distribución del TSumax a 120 KHz para las tres jaulas ordenadas de mayor a menor tamaño de izquierda a derecha. En la parte inferior distribuciones del TSumax para la frecuencia de 200 KHz en el mismo orden.

Se halla una buena correlación entre el aspecto ventral del TS y el logaritmo de la longitud total del atún a 200 KHz pero no es así para 120 KHz. Para esta última frecuencia los valores son

menores de lo esperado, ya que, como marca la ortodoxia, el TS en la zona geométrica (donde el tamaño del pez es mucho mayor que la longitud de onda) debe disminuir con la frecuencia, hecho que no ocurre en este caso.

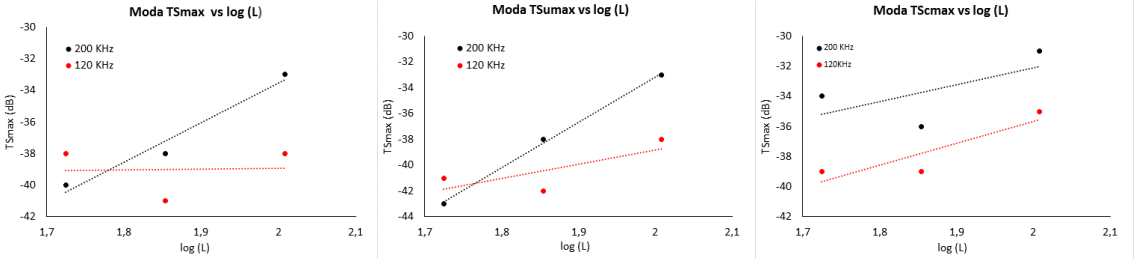



Fig. 6.- Ajustes para las diferentes modalidades del TS tomando la moda de la distribución para cada jaula. En negro para 200 KHz en rojo para 120 KHz.

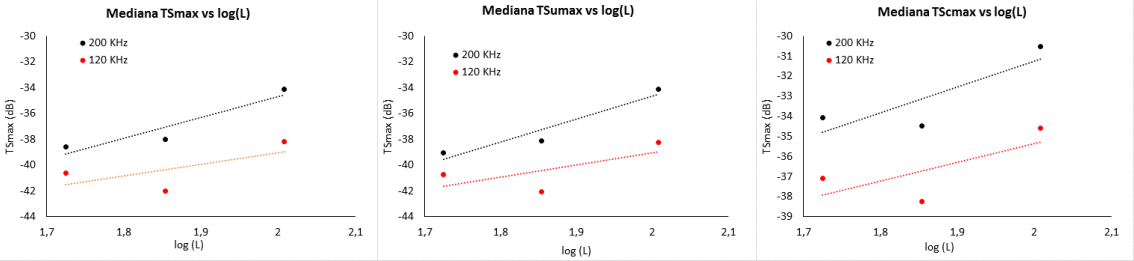



Fig. 7.- Ajustes para las diferentes modalidades del TS tomando la mediana de la distribución para cada jaula. En negro para 200 KHz en rojo para 120 KHz.

En las Fig. 6 y 7 se puede observar que la moda y la mediana nos ofrecen buenos resultados del ajuste entre la longitud media del atún y el TS. El grado de correlación es muy alto cuando se usa para el ajuste el TS máximo sin compensar (con $r^2$ mayor de 0.9), disminuyendo la el valor de $r^2$ al usar el TS máximo pero manteniéndose valores aceptables (con $r^2$ por encima de 0.88), siendo peores los ajustes con el uso del TS compensado. Este hecho puede deberse a la dificultad de establecer correcciones efectivas cuando un blanco de gran tamaño cubre gran parte del haz, o incluso, en algunos casos, puede ser debido a que el pez ocupa el haz por completo (por el tamaño del mismo y la corta distancia que lo separa del transductor).

Usando la moda de las distribuciones a 200 KHz : TS = 35,18(logL) - 103,51 $r^2$ = 0,9974

Usando la moda de las distribuciones a 120 KHz : TS = 11,07(logL) – 60.95 $r^2$ = 0,5701

Usando la mediana de las distribuciones a 200 KHz : TS = 17,73(logL) – 70,12 $r^2$ = 0,9201

Usando la mediana de las distribuciones a 120 KHz : TS = 9,39(logL) – 57,84 $r^2$ = 0,4645

## CONCLUSIONES

Las distribuciones de TS halladas son unimodales, para todas las jaulas estudiadas, siendo menos marcada para la que contiene los peces de menor tamaño. Esto podría explicarse por la

por la falta de detecciones debido a la menor cantidad de ejemplares dentro de la jaula y la disminución de la cantidad de veces que los peces cruzan el haz acústico. En las dos jaulas con atunes de mayor tamaño; donde las detecciones son al menos tres veces mayores, las distribuciones tienen un marcado carácter unimodal.

No se dispone de medidas ventrales para poder determinar si, al igual que para otras especies de peces [3], el TS para las grabaciones dorsales es menor que para las ventrales, posiblemente debido al efecto de apantallamiento de la vejiga natatoria por las estructuras duras del pez.

No obstante, se ha hallado una relación clara entre el aspecto dorsal del TS y el logaritmo de la longitud total del atún. Esta correlación es buena cuando se usa el TS máximo sin compensar (TSumax) o el TS máximo. No ocurre lo mismo al hacer uso del TS máximo compensado, que teóricamente debería presentar los mejores resultados, como sugiere [3]. Este hecho, hace necesario extender el análisis en futuros estudios, en los que las detecciones para todos los tamaños sean lo más parecidas posible, pudiendo comprobar de manera más concluyente la idoneidad del uso del TSumax como parámetro de monitorización del crecimiento de los atunes en jaulas marinas.

A la vista de los resultados obtenidos, tanto el TSmax como el TSumax se podrían emplear para controlar el tamaño de los peces en el interior de una jaula, ya que se obtienen buenas correlaciones. Se ha de tener en cuenta que el TSumax y el TSmax son muy parecidos, posiblemente debido a que la aplicación del segundo umbral de -60 dB elimina gran cantidad de los ecos no deseados. El TS máximo presenta valores ligeramente mayores que el TSumax pero una menor pendiente.

Es necesario ampliar el estudio obteniendo más detecciones en las medidas dorsales y extendiéndolo a medidas ventrales, para comprobar si los valores del TS aumentan en el aspecto ventral, y como afecta aumentar el número de detecciones a la forma de las distribuciones. Así mismo, podría comprobarse si la correlación del TS con la longitud de los atunes es mejora con medidas ventrales como indica la literatura [3].

Así mismo, se hace imperativa la realización de simulaciones para entender cómo afecta la distancia de medida al valor del TS a las dos frecuencias de estudio, y poder clarificar así los

**REFERENCIAS**

[1] De la Gandara, F., C.C. Mylonas, D. Covès and C.R. Bridges (eds) 2010. *SELFDOTT REPORT* 2009, 279 pp.
[2] Ortega,A.; Viguri,J.; Prieto,J.R.; Belmonte,A.; Martinez,D.; Velazquez,M.; De la Gandara,F.; Seoka,M. 2014. "*First results on ongrowing of hatchery reared Atlantic bluefin tuna, Thunnus thynnus, kept in sea cages"*. In: Aquaculture Europe 14, San Sebastián (Spain) 14-17 October 2014: 931-932
[3] F.R. Knudsen, J.E. Fosseidengen, F. Oppedal, Ø. Karlsen, E. Ona, "*Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (Salmo salar)"*, Fisheries Research 69, 205-209 (2002).
[4] Soliveres, E. 2015. "*Estimación de la biomasa de peces en jaulas marinas mediante ultrasonidos*". Phd Thesis, Universitat Politècnica de València.
[5] Bertrand, A., Josse, E., and Massé, J. 1999, *"In situ acoustic target strength measurement of bigeye (Thunnus obesus) and yellow tuna (Thunnus albacares) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking"*. ICES Journal of Marine Science, 56: 51-60.

[6] V. Puig, V. Espinosa, E. Soliveres, A. Ortega, A. Belmonte, F. de la Gándara 2012. *"Biomass estimation of bluefin tuna in sea cages by the combined use of acoustic and optical techniques".* Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 68(1): 284-290 (2012).
[7] H. Balk, T. Lindem, "Sonar 4 and Sonar 5-Pro Post processing systems. Operator manual version 5.9.8", *University of Oslo*, Norway (2009).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE SEÑALES DE ATÚN DE SONARES DE LARGO ALCANCE A BORDO DE BUQUES PESQUEROS

PACS: 43.30.Vh

Jon Uranga[1], Haritz Arrizabalaga[1], Guillermo Boyra[1], Maria Carmen Hernandez[2 3]
[1] AZTI-Tecnalia; Marine Research Division; Herrera Kaia z/g; 20110 Pasaia (Spain).
[2] UPV/EHU, Donostia, Basque Country, Spain
[3] Centro de Investigação e de Tecnologias Agro-Ambientais e Tecnológicas (CITAB), (UTAD), Vila Real, Portugal

*Corresponding author:
Herrera Kaia, Portualdea z/g, 20110, Pasaia (Gipuzkoa)
Email: juranga@azti.es
Tel: (+34) 667174453
Fax: (+34) 946572555

## ABSTRACT

This study presents a methodology for the automated analysis of commercial long-range sonar signals onboard fishing vessels. Currently the only abundance bluefin tuna (*Tunnus thynnus*) in the Bay of Biscay is based at standardized catch per unit of effort (CPUE). Is believed that analogic sonars provide fisheries independent data and to make use of it, sonar screen dumps from fishing vessels are recorded and a methodology for its analysis is proposed. To this end, an semi-automatic image processing method through which tuna schools are morphologically classified, an OCR application (Optical Character Recognition) for fishing behavior data extraction and Kalman filter based temporal study for tracks detection are presented.

## RESUMEN

Este estudio presenta un análisis automático de señales de sonar de largo alcance a bordo de buques pesqueros. Hoy en día, el único índice de abundancia empleado para el atún en el Golfo de Vizcaya, es el CPUE estandarizado. Se cree que los sonares analógicos empleados por la flota pesquera aportan información independiente y, para poder hacer uso de ella, se han grabado imágenes de sonar y se ha diseñado una metodología para analizarlos. Con este objetivo, se ha desarrollado un procesamiento de imágenes semiautomático mediante el cual se clasifican morfológicamente las escuelas de atún, una aplicación OCR (*Optical Character Recognition*) para extraer información sobre el comportamiento durante la pesca y un análisis temporal de las imágenes de sonar empleando filtros Kalman.

## 1. INTRODUCCION

El atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) es una especie emblemática con una gran importancia desde el punto de vista económico para la flota pesquera (Fromentin and Powers, 2005). Debido a la sobreexplotación sufrida en las últimas décadas, se está protegiendo mediante planes de recuperación promovidas por la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT).

El área de estudio ha sido delimitada mediante la actividad de la flota pesquera de cebo vivo. El cual se localiza en el sureste del Golfo de Vizcaya, entre las coordenadas 43-47°N y 2-6°O (Figura 1), durante los meses de junio a octubre.

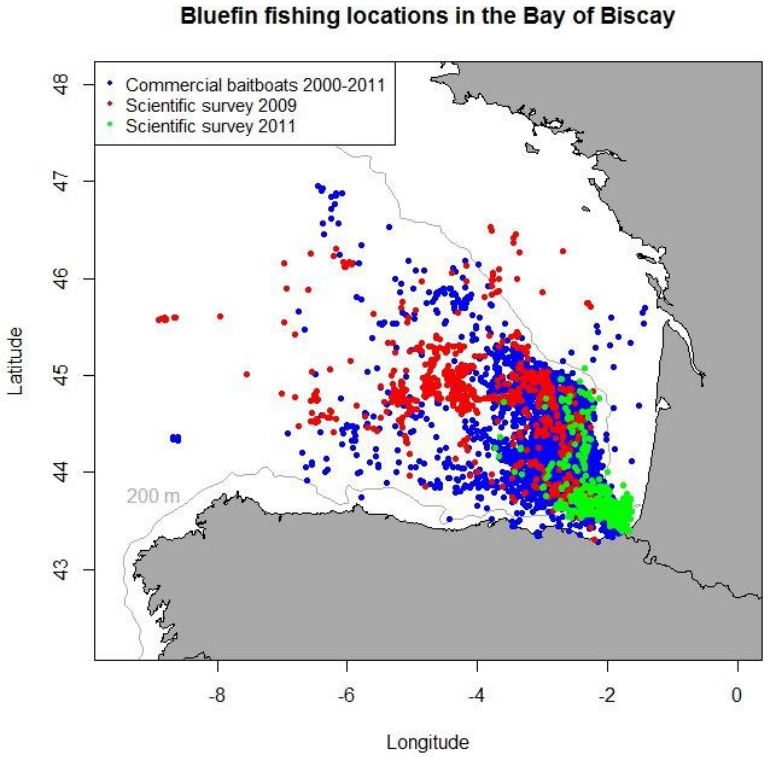



Figura 1. Disciplinas relacionadas con la Acústica

En la gestión para la evaluación del *stock* del atún rojo, se emplean series temporales de las capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) estandarizadas para obtener índices relativos de abundancia. Este método, sin embargo, tiene una serie de inconvenientes como la ausencia de diseños científicos, observaciones correlacionadas, la falta de muestreos aleatorios o la variabilidad de la capturabilidad (Maunder et al., 2006) y, ademas, no necesariamente refleja la tendencia poblacional.

Actualmente el CPUE estandarizado de la flota pesquera vasca en el Golfo de Vizcaya es el único índice de abundancia empleado para el atún en el Atlántico Este (Rodriguez-Marin et al., 2003; Santiago et al., 2014). La capturabilidad de esta especie puede depender de factores como la disponibilidad de comida, hábitos de alimentación o replecidad estomacal (Arreguín-Sánchez, 1996; Stoner, 2004) y esto puede causar dificultades en el proceso de estandarización. La variabilidad interanual de estos factores podría introducir un sesgo en el CPUE.

Las campañas científicas se emplean con la finalidad de aplicar técnicas independientes de las pesquerías comerciales que ayuden a conseguir una evaluación poblacional más fiable de los pequeños pelágicos y peces de fondo (Petitgas et al., 2009). Estas evaluaciones de abundancia son muy utilizadas para la gestión de los stocks, pero hay que tener en cuenta también los problemas asociados que tienen, como la limitación de espacial de la cobertura para el muestreo, las precisiones acústicas verticales o el doble conteo. En la actualidad hay muy pocos estudios independientes de las pesquerías para el atún u otras especies migratorias con áreas de distribución muy amplias. Esto es debido al costo prohibitivo que supone muestrear áreas de estudio tan amplias.

Pero en el Golfo de Vizcaya la gran mayoría de la flota utiliza un sonar de largo alcance (LRS) para la búsqueda del atún y se cree que, con la información proporcionada por estos dispositivos, se podría obtener el número de bancos de atún y sus dimensiones en el área de estudio de manera independiente. Los LRS son analógicos y no-científicos, esto quiere decir que no se almacenan los datos acústicos. Por ello, se ha diseñado un sistema para grabar las imágenes de pantalla de los sonares que se podría instalar fácilmente en la mayor parte de la flota pesquera durante las campañas de pesca del atún. A su vez, se propone una nueva metodología automática de análisis de imágenes que aporta información muy valiosa que, hasta ahora, no se ha aprovechado. De esta manera, se adquiere y procesa una cantidad masiva de imágenes que, a su vez, aportan el conocimiento de gran parte de la flota.

El objetivo principal es desarrollar y validar un procesamiento automático de imágenes grabadas a bordo de la flota pesquera durante su actividad pesquera rutinaria en el Golfo de Vizcaya y dar el primer paso hacia el desarrollo de un índice de abundancia de esta especie.

## 2. METODOLOGIA

Se presentan tres técnicas diferentes que han sido desarrollados para poder ser empleadas conjuntamente: procesamiento de imágenes automático, aplicación OCR y análisis temporal de las imágenes mediante filtros Kalman.

### 2.1. Procesamiento de Imágenes Automático y Clasificación Supervisada

El primer paso es el de procesar las imágenes de sonar. Las imágenes seleccionadas han sido tomadas durante las campañas de pesca de verano del año 2009 y 2011. Han sido seleccionadas un total de seis series representativas: 3 series de agosto del 2009 y otras tres series de agosto del 2011.

Como se puede observar en la Figura 2, se realizan los siguientes pasos: un pre-procesado de las imágenes, una segmentación y una extracción de características de las regiones obtenidas en la segmentación. Mediante dicha tarea de extracción, se obtienen las características morfológicas (20 características) de las regiones, relativas a las imágenes de sonar obtenidas durante los eventos de pesca del atún.

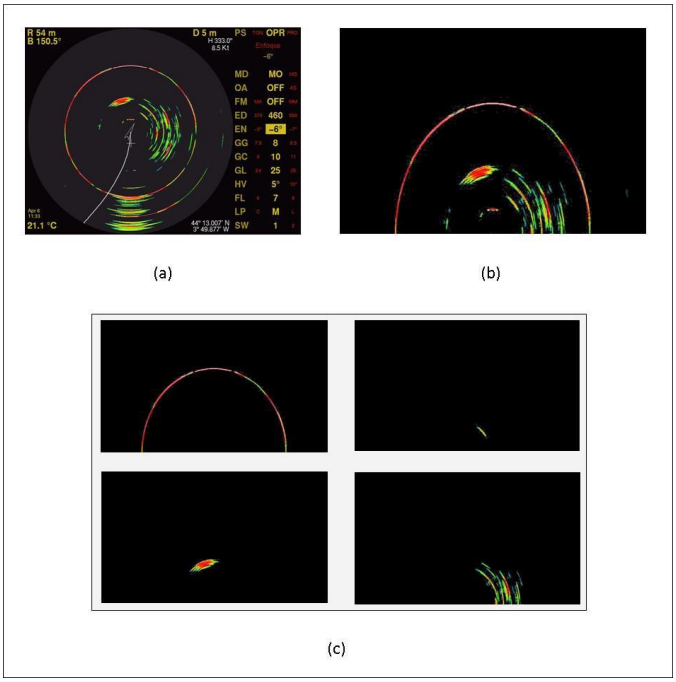



Figura 2. Procesamiento automático de las imágenes de sonar.

Mediante dichas características se genera una base de datos que está compuesta por 1397 casos de presencia y 1398 casos de ausencia de atún. Después de realizar el preprocesado, se obtienen 22411 regiones que se utilizan en la construcción de la base de datos binaria (presencia/ausencia). Del total de los casos, 1407 casos son positivos (presencia) y 21004 casos negativos (ausencia). El uso de bases de datos no-balanceadas suelen causar problemas en estudios de clasificación y, por eso, se han aplicado técnicas sub-muestreo (*Spread Sample filter* [Witten2011]) y sobre-muestreo (*Synthetic Minority Oversampling Technique* [Chawla2002]).

De este modo, finalmente obtenemos tres bases de datos de 22501 (TOTAL), 23998 (SMOTE) y 11999 (SPREAD) instancias, con 20 características morfológicas que han sido analizadas mediante un estudio comparativo de clasificación supervisada, empleando clasificadores de distintas familias como: *Random forest* (RF) [Breiman2001], *Multilayer perceptron* (MLP) [Bishop1995], *k-Nearest Neighbors algorithm* (IBk) [Fix1951], el árbol de decisión J48 [Quinlan1996] y el *Support Vector Machine* (SVM) [Burges1998].

Para evaluar la eficiencia y la eficacia de los diferentes métodos de clasificación, se han calculado los valores medios de los índices: Kappa [Cohen1960], Sensibilidad (*Sensitivity*) [Fielding1997], Especificidad (*Specificity*) [Hanley1982] y AUC (curva ROC) [Hanley1982]. Los resultados de los experimentos se han analizado en base a la desviación mínima, máxima, media y estándar de los índices Kappa, sensibilidad, especificidad y AUC. Estos resultados se han obtenido después de realizar 30 ejecuciones y una validación cruzada de 10 *folds*, a fin de evitar el sobre-entrenamiento y conseguir resultados estables.

### 2.2. Aplicación OCR y Análisis mediante Filtros Kalman.

Mediante la técnica de reconocimiento óptico de caracteres (*Optical Character Recognition, OCR*), se reconoce y extrae de las capturas de pantalla de imágenes de sonar grabadas a bordo de buques pesqueros en campañas de pesca a cebo vivo del atún en el Golfo de Vizcaya. Para el reconocimiento, la técnica sigue los siguientes pasos: selección de las zonas de interés, preprocesado de las imágenes, segmentación de las zonas de interés, extracción de

características, reconocimiento de los caracteres y validación de resultados. Los caracteres alfanuméricos reconocidos se muestran en la Figura 3 y corresponden a los parámetros de situación (velocidad, rumbo, localización GPS) y la configuración de sonar (ganancias, inclinación, ancho del haz). La aplicación de OCR se ha desarrollado mediante el programa estadístico R [#Team2008].

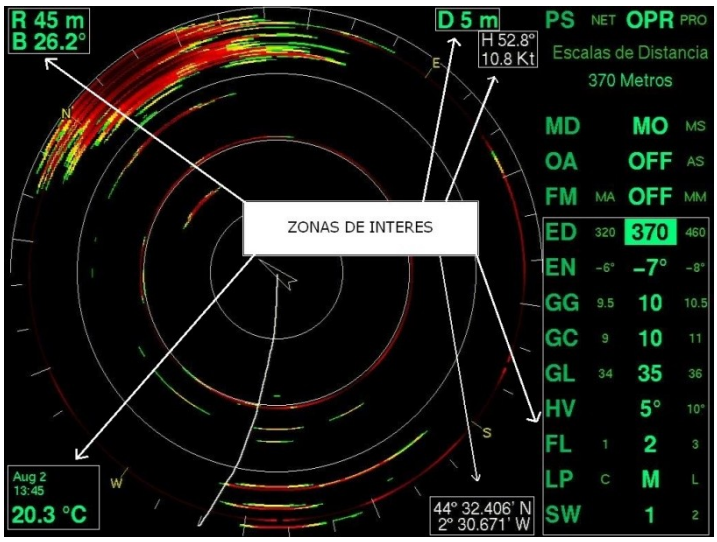



Figura 3. Zonas de interés y parámetros extraídos de las imágenes de sonar.

Mediante los filtros de Kalman se estima la posición actual de un objeto (en nuestro caso, el objeto lo extraemos del procesamiento de imágenes de sonar), en base a mediciones no precisas y a la posición en estados anteriores. Conociendo el último estado del objeto, el nuevo estado se calcula estimando los estados históricos previos y las medidas asociadas a todos estos estados. Pueden darse casos de falsa alarma o detecciones ruidosas que, a su vez, generan eventos de no-objeto. Debido a que estos eventos no son fáciles de distinguir se suele recurrir a la *Data Association* [Raol 2009] para determinar qué eventos son similares al objeto estudiado. Más concretamente, se ha empleado el clasificador morfológico y las características extraídas de las imágenes de sonar para agrupar los bancos y determinar los rangos de presencia del atún en las bases de datos y, a continuación, se han aplicado los filtros Kalman en dichos rangos temporales.

Existen diferentes tipos de filtros Kalman, el filtro Kalman básico, el basado en el algoritmo KNN (*K-Nearest Neighborhood*) y el filtro PDAF (*Probabilistic Data Association Filter*) [Brinkmann 2010]. En general, todos ellos realizan los siguientes pasos: predicción, detección, adaptación, actualización y generación de nuevos *tracks*. Los algoritmos KNN y PDAF se diferencian en el paso de adaptación, donde el primero elige el estado que se encuentra más cerca del track para la adaptación mientras que el segundo selecciona el objeto que, con mayor probabilidad, se encuentra cerca del track.

## 3. RESULTADOS

Respecto al procesamiento de imágenes automático y clasificación supervisada, los resultados obtenidos para cada índice y para las tres bases de datos, pueden observarse en la Figura 4.

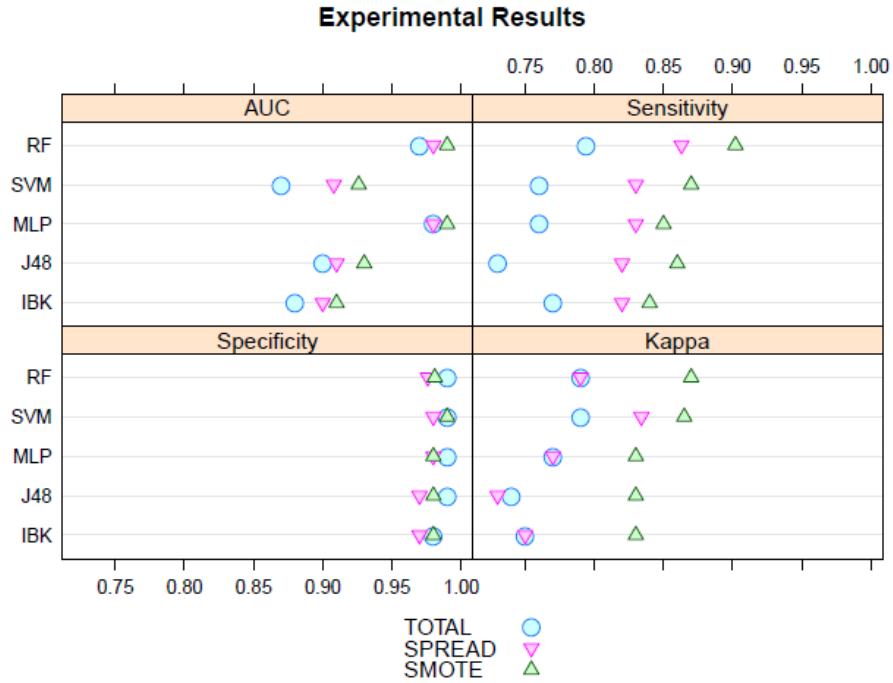



Figura 4. Resultados de la clasificación supervisada.

Los resultados de los test de validación de la Clasificación Supervisada obtenida a partir del Procesamiento de Imágenes Automático han demostrado que todos los algoritmos tienen una buena eficiencia en la clasificación. Entre las tres bases de datos utilizadas en el experimento, la base de datos total ha obtenido un buen rendimiento general, el SPREAD mejora el rendimiento general y SMOTE mejoró aún más la sensibilidad de los algoritmos. El algoritmo de RF, junto con el filtro de suavizado, ha demostrado ser el más preciso. Sin embargo, el objetivo principal del experimento no fue seleccionar el mejor algoritmo, sino hacer un estudio comparativo de los mismos. El buen rendimiento general permite validar el Procesamiento de Imágenes Automático propuesto, demostrando así la viabilidad de la metodología propuesta.

En la aplicación OCR, para evaluar los resultados obtenidos en la generación de las bases de datos supervisadas y de test, se ha generado una matriz de confusión a partir del vector obtenido en el reconocimiento y el vector empleado en el etiquetado supervisado. Los resultados han sido evaluados mediante las estadísticas de la precisión y el índice de validación Kappa. Se han obtenido resultados casi del 100% de acierto.

Se han realizado dos experimentos con los filtros de Kalman. En primer lugar y para ajustar los parámetros de los filtros Kalman, se ha utilizado la misma base de datos de la Clasificación Supervisada, donde se han detectado 22 tracks GT (tracks *Ground Truth*) de atún por medio de juicio experto.

Por otra parte, se ha diseñado un programa de conteo que establece rangos temporales en los cuales el algoritmo de clasificación ha detectado atún. Los parámetros de este programa (frecuencia de presencia del atún entre diferentes bancos y dentro del mismo banco y porcentajes atún dentro del banco) han sido obtenidos después de un análisis de sensibilidad, y mediante él, se obtiene el inicio y final de cada que cada rango temporal en el cual se ha detectado atún a partir del algoritmo de clasificación.

Una vez definidos los rangos de búsqueda dentro de la base de datos completa, se aplican los filtros de Kalman y se obtienen los tracks. Mediante esta solución se ha intentado aprovechar el potencial de ambas técnicas.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1. Se muestran los rangos, las longitudes de los tracks, el solapamiento temporal entre los tracks y el resultado del conteo para los dos tipos de filtros de Kalman utilizados (KNN y PDAF), el solapamiento temporal entre los tracks y los tracks GT (KNN y PDAF), el solapamiento temporal entre los tracks obtenidos mediante el algoritmo de conteo y los tracks GT así como el área media de los track detectados (en el conteo) y un indicador de la detección:

| Track | inicio-fin | | Longitud Track | Tracks vs conteo (KNN) | Tracks vs conteo (PDAF) | TRACK vs tracks GT (KNN) | TRACK vs tracks GT (PDAF) | Conteo vs tracks GT | Area media | Acierto |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19288 | 19390 | 102 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 4547,1068 | ✓ |
| 2 | 19498 | 19561 | 63 | 23 | 23 | 19 | 19 | 19 | 1570,26563 | ✓ |
| 3 | 19623 | 19726 | 103 | 80 | 80 | 73 | 73 | 73 | 6676,17788 | ✓ |
| 4 | 20015 | 20250 | 235 | 222 | 203 | 179 | 161 | 180 | 25152,601 | ✓ |
| 5 | 10206 | 10328 | 122 | 106 | 107 | 103 | 104 | 104 | 32078,6504 | ✓ |
| 6 | 13715 | 13801 | 86 | 65 | 75 | 64 | 64 | 64 | 12950,0977 | ✓ |
| 7 | 14170 | 14266 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 49287,866 | ✓ |
| 8 | 21145 | 21178 | 33 | 19 | 20 | 19 | 20 | 20 | 4512,35294 | ✓ |
| 9 | 22550 | 22612 | 62 | 29 | 18 | 16 | 16 | 15 | 4967,30423 | Doble |
| 9 | 22682 | 22712 | 30 | 21 | 21 | 19 | 19 | 20 | 5521,56452 | Doble |
| 10 | 23260 | 23308 | 48 | 26 | 22 | 22 | 22 | 18 | 7714,69728 | ✓ |
| 11 | 23564 | 23579 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | X |
| 12 | 23598 | 23627 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | X |
| 13 | 23711 | 23726 | 40 | 17 | 19 | 26 | 26 | 17 | 5552,04878 | ✓ |
| 14 | 23759 | 23793 | 34 | 16 | 16 | 26 | 26 | 17 | 6186,91429 | ✓ |
| 15 | 23823 | 23958 | 135 | 79 | 80 | 26 | 26 | 17 | 13429,7935 | ✓ |
| 16 | 24311 | 24322 | 11 | 6 | 4 | 13 | 8 | 6 | 6362,33333 | Doble |
| 16 | 24331 | 24351 | 20 | 7 | 7 | 17 | 15 | 5 | 3884,28571 | Doble |
| 17 | 24382 | 24439 | 57 | 22 | 21 | 25 | 24 | 13 | 3719,94828 | ✓ |
| 18 | 24473 | 24487 | 14 | 12 | 12 | 22 | 22 | 11 | 4176,2 | ✓ |
| 19 | 25559 | 25598 | 39 | 38 | 36 | 38 | 36 | 38 | 8785,4 | Doble |
| 19 | 25636 | 25692 | 56 | 46 | 47 | 37 | 38 | 39 | 6849,2617 | Doble |
| 20 | 7746 | 7985 | 239 | 223 | 227 | 224 | 228 | 231 | 8872,59964 | ✓ |
| 21 | 32345 | 32455 | 110 | 110 | 109 | 110 | 109 | 110 | 29378,1306 | ✓ |
| 22 | 3472 | 3531 | 59 | 41 | 38 | 41 | 38 | 43 | 11080,9056 | ✓ |

Tabla 1. Resultados del filtro Kalman en combinación con la Clasificación Supervisada.

## 4. CONCLUSIONES

Respecto al trabajo de clasificación supervisada realizado, los resultados obtenidos indican que el procesamiento de imágenes automático es adecuado para discernir morfológicamente las regiones estudiadas en la clasificación binaria de presencia/ausencia del atún en las imágenes de sonar.

Respecto a la aplicación OCR, los resultados obtenidos tanto en la generación de las bases de datos (entrenamiento y test) como en el procesado de una serie de imágenes reales dejan un balance positivo. La metodología diseñada ha resultado ser la correcta y los resultados han confirmado la robustez de la aplicación. Cabe resaltar que mediante los parámetros obtenidos con esta aplicación, se realizará la estandarización de las áreas extraídas en las detecciones y, a su vez, se podrán establecer nuevas reglas (paradas de pesca, cambios de velocidad/orientación y geo-referenciación de las imágenes) referidas al comportamiento durante los eventos de pesca que ayudarán a mejorar los resultados en la detección.

Los filtros Kalman en combinación con el clasificador morfológico han demostrado ser capaces de agregar y detectar de manera suficientemente precisa la presencia de atún en las bases de datos en las bases de datos estudiadas. Se podría decir que los filtros Kalman realizan una estimación más optimista, mientras que la estimación del conteo depende de la calidad de la clasificación. No obstante y debido a la gran variedad en la composición (longitud, morfología, presencia/ausencia atún) de los tracks elegidos para la base de datos, no se ha conseguido que la metodología presentada detecte el 100% de los tracks y el problema del doble conteo todavía no se ha resuelto. En este sentido, se podrían introducir algunas reglas morfológicas (consistencia morfológica) o temporales (mediante los parámetros OCR), para poder identificar estos casos.

Sobre los objetivos generales del proyecto, cabe mencionar que tanto la validación del procesamiento de imágenes automático, como el desarrollo de la aplicación OCR y la validación del uso de los filtros Kalman, representan un paso hacia adelante en el objetivo general del estudio que es el avanzar en el desarrollo de una evaluación directa para el atún rojo en el Golfo de Vizcaya.

## 5. BIBLIOGRAFIA

Arreguín-Sánchez, F. 1996. Catchability: a key parameter for fish stock assessment. Reviews in fish biology and fisheries **6**: 221-242.

Bishop, C. M. 1995. Neural networks for pattern recognition. Oxford university press.

Breiman, L. 2001. Random Forests. Mach. Learn. **45**: 5-32.

Brinkmann, M. A. (2010). Tracking and classification of divers in sonar images.

Burges, C. J. C. 1998. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Data Mining and Knowledge Discovery **2**: 121-167.

Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O. and Kegelmeyer, W. P. 2002. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. Journal of artificial intelligence research, 321-357.

Cohen, W. W. 1995. Fast Effective Rule Induction. In: Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning, Lake Tahoe, California, USA. p 115-123.

Fielding, A. H., and J. F. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental conservation **24**: 38-49.

Hanley, J. A., and B. J. McNeil. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. Radiology **142**: 29-36.

Fromentin, J. M., and J. E. Powers. 2005. Atlantic bluefin tuna: population dynamics, ecology, fisheries and management. Fish and Fisheries **6**: 281-306.

Maunder, M. N. et al. 2006. Interpreting catch per unit effort data to assess the status of individual stocks and communities. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil **63**: 1373-1385.

Quinlan, J. R. 1993. C4.5: programs for machine learning. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Mateo, CA.

Rodriguez-Marin, E. et al. 2003. Standardization of bluefin tuna, Thunnus thynnus, catch per unit effort in the baitboat fishery of the Bay of Biscay (Eastern Atlantic). ICES Journal of Marine Science **60**: 1216.

Raol, J. R. Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB®. CRC Press, 2009.

Santiago, J., H. Arrizabalaga, M. Ortiz, and N. Goñi. 2014. Updated Standardized bluefin tuna CPUE index of the Bay of Biscay baitboat fishery (1952-2013). SCRS/2014/054, ICCAT.

Stoner, A. 2004. Effects of environmental variables on fish feeding ecology: implications for the performance of baited fishing gear. Journal of Fish Biology **65**: 1445-1471.

Witten, I. H., and E. Frank. 2005. Data Mining: Practical machine learning tools and techniques. Morgan Kaufmann.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ESTIMACION ACUSTICA DE LAS ABUNDANCIAS DEL PLANKTON E ICTIOFAUNA PELAGICOS EN EL GOLFO DE BIZKAIA

PACS: 43.30.Sf

Beatriz Sobradillo Benguria
AZTI-TECNALIA
Muelle de la Herrera, Zona Portuaria s/n – 20110 Pasaia
Tel: +34 667 174 500, +34 652 714 457
E-mail: bsobradillo@azti.es

## ABSTRACT

One of the main objectives of hydroacoustics is estimating the abundance of marine organisms. The use of transducers of different frequencies allows taking into account the frequency response of different species for their identification. This is especially useful when dealing with night acoustic data, in which the identification is more difficult due to the disappearance of fish schooling. The objective of this project is to develop a multi-frequency identification algorithm to identify acoustic echoes of different components of the trophic chain as fishes and plankton species.

## RESUMEN

Uno de los objetivos principales de la hidroacústica es estimar la abundancia de organismos marinos. El uso de transductores a distintas frecuencias permite utilizar la respuesta en frecuencia de las distintas especies para su identificación. Esto es de gran utilidad cuando se manejan datos de acústica nocturna, donde la identificación de especies es más complicada debido a la dispersión de los bancos. El objetivo de este proyecto es desarrollar un algoritmo multifrecuencia para la identificación de ecos acústicos de los distintos componentes de la cadena trófica como peces y plancton.

## INTRODUCCIÓN

El Golfo de Bizkaia alberga la mayor población de anchoa Europea (*Engraulis encrasicolus L.)* siendo ésta uno de los recursos pesqueros más importantes del Mar Cantábrico. Para proporcionar un asesoramiento adecuado a la gestión de su pesquería son necesarios monitoreos y estimas de población anuales. La abundancia de la anchoa en el Golfo de Bizkaia se estima mediante un modelo Bayesiano basado en la biomasa, que emplea datos de las capturas y estimas de biomasa obtenidos durante dos campañas de primavera: una acústica

llevada a cabo por IFREMER y una basada en el Método de la Producción Diaria de Huevos (MPDH) proporcionada por AZTI-Tecnalia (ICES, 2012). La serie temporal de ambas estimas de biomasa muestra una correlación positiva significativa (Fig 1) pero algunos años muestran importantes discrepancias. En concreto en el año 2012 Ifremer estimó 188.000 t de anchoa mientras que AZTI dio una cifra de 41.742 t (Santos M, *et al*. 2012).

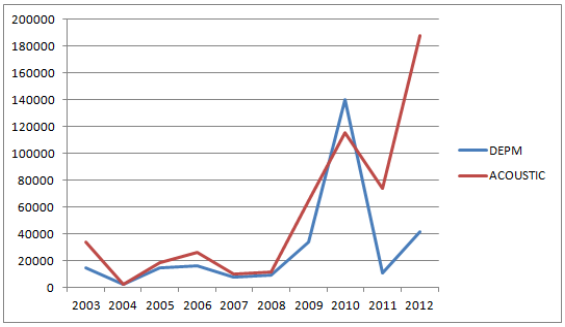



Fig 1. Correlación positiva en la estima de biomasa obtenida mediante DEPM y acústica.

Ambas campañas recogen datos adicionales que pueden ser utilizados para reducir la incertidumbre del asesoramiento.

Dos de estas fuentes de información complementaria son los datos acústicos y de capturas que se obtienen durante la campaña BIOMAN. Estos datos podrían emplearse para estimar la biomasa de la anchoa, teniendo en cuenta que la mitad de estos datos han sido recogidos durante la noche. Las estimas de biomasa calculadas mediante métodos acústicos utilizan generalmente sólo datos registrados durante el día. Esto se debe a los patrones de agregación y estratificación vertical presentes durante este periodo, que hacen que la diferenciación entre las distintas tipologías sea más clara y, por tanto, facilitan la discriminación entre especies.

Por el contrario, los datos nocturnos son más difíciles de analizar ya que las especies cambian su distribución tendiendo a dispersarse y mezclarse en los primeros metros de la columna de agua. Recientemente Ballón *et al* (2011) desarrollaron un algoritmo para discriminar entre distintos grupos tróficos y Lezama-Ochoa *et al* (2011) lo adaptaron al Golfo de Bizkaia. El uso de este algoritmo para analizar los datos nocturnos permite distinguir entre peces y otros dos grupos de especies plantónicas (mayormente crustáceos), pudiendo llegar a sustituir el método visual de inspección de ecogramas nocturnos utilizado tradicionalmente.

El objetivo general de esta tesis fue desarrollar una metodología para estimar la abundancia y distribución espacial de la anchoa en el Golfo de Bizkaia, empleando datos acústicos registrados durante la campaña del MPDH de Bioman.

Para ello se combinó el método bifrecuencia de Lezama-Ochoa *et al.* (2011) con los datos de huevos y arrastre pelágico para la evaluación de la biomasa de la anchoa en el Golfo de Bizkaia. Esta metodología se aplicó a los datos de BIOMAN 2012 y se comparó el resultado con el obtenido en las campañas de anchoa de otoño 2011 y primavera 2012 a modo de validación preliminar del método. El resultado positivo de esta validación preliminar abre la posibilidad de emplear esta información en el futuro mejorando ciertos aspectos con respecto a la metodología actual.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Área y Estrategia de Muestreo

La campaña de BIOMAN 2012 se llevó a cabo en Mayo, durante la época de puesta, cubriendo todo el área de puesta de anchoa del Golfo de Bizkaia. El muestreo empezó en la costa Norte española, en dirección Este-Oeste (5ºW), y continuó hacia el Norte para cubrir las aguas francesas del Golfo (47ºN). El muestreo se realizó de manera sistemática durante el día y la noche, siguiendo transectos paralelos que conforman una cuadrícula regular (Fig 2).

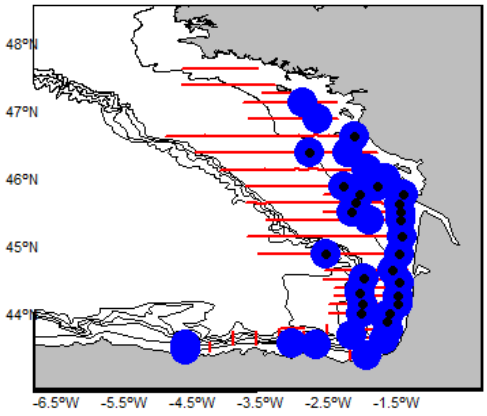



Fig 2. Transectos realizados durante la campaña (líneas rojas), estaciones de muestreo de pesca de arrastre (puntos azules) y estaciones positivas para anchoa (puntos negros).

Participaron dos buques oceanográficos en la campaña: el B/O Ramón Margalef (RM), encargado del muestreo de plancton, y el B/O Emma Bardán (EB), encargado del muestreo de adultos. El RM siguió un diseño de campaña sistemático ajustándose a la cuadrícula de estaciones de plancton, mientras que el EB se dirigía hacia las áreas positivas de huevos para recoger muestras de adultos mediante pesca de arrastre pelágico.

### Recogida de datos

Se combinaron tres tipos de datos para la evaluación de la biomasa:

- La retrodispersión acústica total
- Proporción de especies y tamaños por clases
- Longitudes medias

1. Datos acústicos
   Los datos acústicos fueron registrados en los dos barcos con la ecosonda científica de haz partido Simrad EK60 (Kongsberg Simrad AS), pero solo los del RM se emplearon para el análisis. El muestreo se realizçó con 5 frecuencias: 38, 70, 120, 200 y 333 kHz. Los transductores fueron instalados de manera que mirasen verticalmente hacia abajo, a unos 2.5m de profundidad, al final de un tubo acoplado al casco de la embarcación. La longitud de pulso se estableción a 1024ms.
   La calibración de la ecosonda se llevó a cabo siguiendo la metodología estándar de Foote *et al* (1987). El muestreo acústico de la columna de agua se hizo hasta los 200m de profundidad, y se ecointegró cada haz en capas de profundidad de 50m de grosor y ESDUs (Elementary Sampling Distance Units) de 0.1 millas náuticas de longitud.

Los valores de NASC resultantes se usaron en los siguientes análisis. Tanto la selección de los datos, como su clasificación y análisis fueron realizados con Echoview (SonarData), MATLAB (Mathworks) y R software.

2. Datos biológicos
La identificación de especies y clases de tamaños mediante los ecos de los peces depende de la identificación mediante pesca de arrastre. Se empleó una red de 15m de apertura vertical y 1cm de luz de malla.
Las estaciones de pesca se decidieron basándose primeramente en la concentración de huevos y después en la tipología de los ecos detectados. El EB se dirigía a áreas de alta concentración de huevos de anchoa y una vez allí, muestreaba el área en busca de las agrupaciones típicas de anchoa.

**Análisis de datos**

1. Regiones y pescas de referencia

El área positiva se identificó basándose en la presencia de huevos de anchoa siguiendo la metodología de Bioman (ICES 2012) en la que la zona positiva de cada transecto se extiende desde la estación de huevos más costera a la última más alejada de la costa, incluyendo los espacios como áreas positivas (Fig. 2). El área positiva se divide en subáreas en base a la abundancia de huevos de anchoa y la distribución de tallas (ICES2012). Se obtuvieron así 6 regiones (Fig. 3).

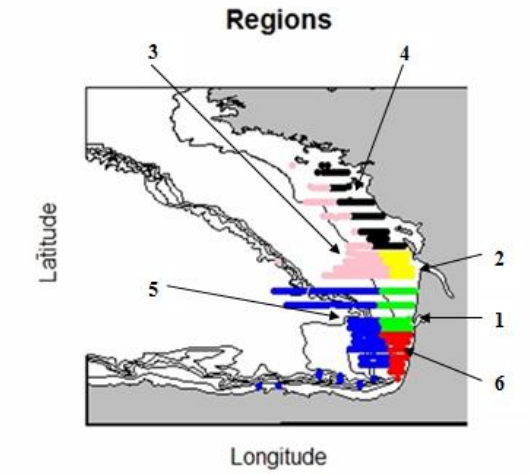



Fig 3. Mapa que muestra la distribución de los huevos durante la campaña de BIOMAN. Las regiones fueron establecidas siguiendo este patrón.

Se estableció una pesca de referencia virtual para cada sub-área, promediando los lances de cada área. Esta pesca de referencia es un lance virtual representativo de todas las pescas de la misma región.

2. Minería de datos y software

a. Método bifrecuencial de clasificación

La discriminación de los ecos acústicos se realizó mediante el método acústico bifrecuencial desarrollado por Ballón *et al.* (2011) y adaptado a las aguas del Golfo de Bizkaia por Lezama-Ochoa *et al.* (2011). Se utilizan las frecuencias 38 y 120 kHz para extraer información de alta resolución continua y simultánea, sobre los patrones espacio-temporales de los peces pelágicos y otros organismos (fluid like) (Stanton *et al.,* 1996) como eufasiáceos y copépodos grandes. El algoritmo bifrecuencial fue aplicado usando Echoview (Myriax software).

b. Eliminación del ruido

Se sincronizó el número de disparos y la posición entre los ecogramas de ambas frecuencias, eliminando disparos con retrasos mayores de 60 segundos, asegurando así el mismo número de disparos en ambas frecuencias. También se eliminó el ruido, mayormente de superficie (a 10m de distancia del transductor) y múltiples ecos provenientes del fondo. Se limpiaron los ecogramas definiendo y eliminando regiones que tuvieran ruidos parásitos (señales presentes en el medio pero que no provienen de la transmisión de la ecosonda; Urick 1986) y la cola del banco de peces (la parte difusa al final del banco, bajo la mancha de mayor densidad). También se eliminó el ruido asociado a la absorción acústica (*Korneliussen, 2000; Fernandes et al. 2006)* mediante esta función de ruido:

$$20\log(R) + 2\alpha R + O$$

Donde R es el rango (m), α es el coeficiente de absorción acústica (dB m-1), y O es el valor de desviación (dB), i.e. el ruido inicial que se asume en el primer metro. Este último parámetro se determinó siguiendo el protocolo del proyecto SIMFAMI para eliminar ruido con Echoview (Fernandes *et al,.* 2006)

c. Patrones de discriminación

Tras eliminar el ruido y corregir manualmente los errores de fondo, el método se basaba en la diferencia entre la fuerza de retrodispersión media de un volumen de dos frecuencias (ΔMVBS 120-38) (Lezama-Ochoa *et al,* 2011). Esta diferencia se usa para determinar las características de la retrodispersión biológica (Murase *et al.,* 2009). La vejiga natatoria es el órgano primario responsable de la energía acústica reflejada por peces (Foote, 1980b). Es un órgano lleno de gas ubicado en la cavidad del cuerpo, presente en muchos peces, que les ayuda a controlar la flotabilidad. Sus propiedades acústicas se deben al gran contraste de densidad que hay entre el gas y el medio fluido, y constituye la mayor parte de la energía en los ecos de peces. Durante la noche la vejiga se llena de gas (y suben a superficie) y durante el día se vacía (descienden en la columna de agua). Cualquier cambio en el tamaño de la vejiga natatoria conlleva a un cambio en el Target Strength del pez. Algunos autores han observado que el TS depende de la profundidad en peces con vejiga natatoria (Edwards and Armstrong, 1983; Olsen and Ahlquist, 1989; Mukai and Iida, 1996; Ona *et al*, 2001b; Ona, 2003; Gorska and Ona, 2003)

Los datos fueron procesados con una hoja de cálculo de Excel y EchoR, una librería basada en R (RCRAN) destinada a calcular la biomasa a partir de campañas acústico-pesqueras (Doray et al. 2010).

EchoR es una librería basada en R diseñada por Ifremer para almacenar datos acústico-pesqueros y calcular indicadores acústicos para el monitoreo del ecosistema marino mediante campañas. Está diseñado para almacenar datos acústicos, de navegación y de pescas realizadas durante las campañas ecosistémicas (EchoBase) y un conjunto de códigos de R (EchoR) para calcular indicadores de estado del ecosistema.

d. Integración del eco acústico

Se dividieron los ecos en 4 ecotipos diferentes (Doray *et al.,* 2010): D1, del fondo a 10 metros sobre el fondo, D2, de 10 a 25 metros sobre el fondo, D4 desde la superficie (10m de profundidad para evitar el ruido de superficie) hasta el ecotipo D2, y D5 para todos los datos de noche (hasta los 50m de profundidad) (Fig. 4). Se definió un quinto ecotipo en el que se incluía la energía de toda la columna de agua, que sería considerado valor de referencia (ecotipo D3). La evaluación se realiza solo con los datos correspondientes a la frecuencia 38kHz. Sin embargo, durante el día, se utilizan también los ecogramas registrados por otras frecuencias para aislar las marcas de peces de las capas de dispersión del sonido (SSLs).

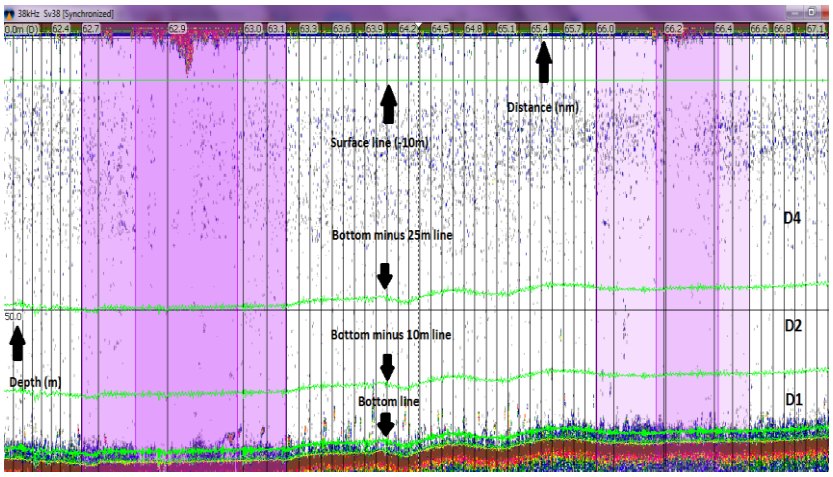



Fig 4. Ecograma con sus componentes principales y ecotipos definidos como D1, D2, D3 y D4.

Cada especie tiene una respuesta acústica diferente, definida por su sección eficaz de dispersión que mide la cantidad de energía acústica incidente en el blanco que es retrodispersada. Esta sección eficaz de dispersión depende de la especie *i* y del tamaño del blanco *j*, según:

$$\sigma_{ij} = 10^{TS_j/10} = 10^{\{(a_i + b_i \log L_j)/10\}}$$

Donde *Lj* representa el tamaño por clases, y las constantes αi y *b*i se determinan empíricamente para cada especie. En este estudio se utilizó la relación TS-talla acordada en el ICES WGACEGG para las principales especies:

$$TS_j = -72.6 + 20 \log L_j$$

Pero, en el caso de la anchoa, la estima de biomasa se realizó también con la relación TS-talla (b20) utilizada por Ifremer (-71.2dB) (Doray *et al.,* 2010), para poder comparar los resultados en la misma escala.

Dentro de cada región homogénea, se calculó una sección eficaz de dispersión media para cada especie, con la distribución de tallas de dicha especie obtenida a partir de las pescas del estrato:

$$\langle \sigma_i \rangle = \frac{\sum_j w_{ij} \sigma_{ij}}{w_i}.$$

La retrodispersión acústica corregida con el calibrado fue ecointegrada por Unidades Elementales de Distancia de Muestreo (Elementary Sampling Distance Units, ESDU) de 0.1 millas náuticas.

La retrodispersión media ecointegrada en cada región homogénea, Em = < *SA* >, se particionó en base a la composición de especies por tallas de cada región. Así, la partición de energía de cada especie *i*, Ei, se calculó:

$$E_i = \frac{w_i \langle \sigma_i \rangle E_m}{\left( \sum_i w_i \langle \sigma_i \rangle \right)}$$

Donde el término entre paréntesis es la suma de todas las especies de la región.
Finalmente, el número de individuos *Fi* de cada especie se calculó:

$$F_i = H \cdot l \frac{E_i}{\langle \sigma_i \rangle}$$

Donde *l* es la distancia positiva del transecto en el estrato y *H* es la distancia entre transectos (15mn). Para convertir el número de peces en biomasa, se utiliza la relación tamaño-talla de cada región para obtener el peso medio de los peces en cada estrato.

$$< W_i >= a \cdot < L_i >^b$$

Así la biomasa se obtiene multiplicando Fi veces <Wi>.

e. Definición del período día-noche

La migración vertical de las especies pelágicas es un comportamiento típico que se observa en casi todas las escalas espaciales (Haury *et al.,* 1978). La migración afecta a las estimas de biomasa, densidad y tamaño, ya que hay algunas especies que migran más allá del rango de muestreo acústico (150m para nuestro estudio). Por esto, los datos día y noche fueron considerados como ecotipos diferentes y procesados de manera independiente. Los datos correspondientes a los períodos comprendidos 15 minutos antes y después de la puesta y salida del sol fueron eliminados, y se utilizaron solo períodos de luz y oscuridad consistentes.

## RESULTADOS

### Composición de Especies en las Pescas

Un total de 42 pescas de arrastre pelágico se emplearon para identificar los registros acústicos, todos llevados a cabo por el B/O Emma Bardán. La composición de especies de las pescas se promedió para cada una de las 6 sub-regiones identificadas en el proceso de estimación de abundancia MPDH (ICES, 2012) (Fig 5). Se observó un predominio de detecciones de anchoa en las áreas positivas, especialmente en regiones donde se detectó anchoa de menor tamaño (reclutas de 1 año de edad), i.e., regiones 1-4 y 6.

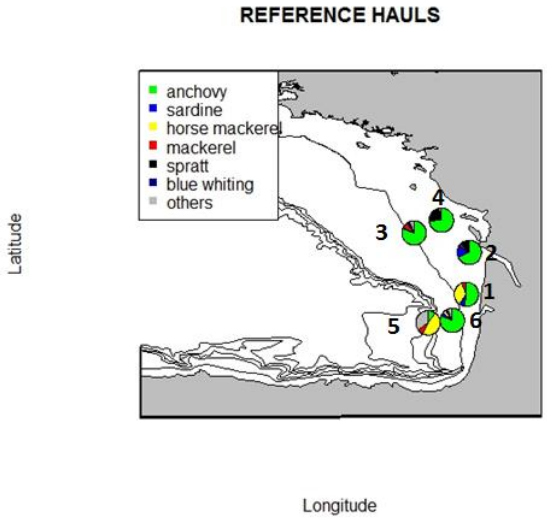



Fig 5. Pescas de referencia de cada región con su composición de especies.

**Estimas de Biomasa**

Las estimas de biomasa obtenidas utilizando la relación de TS-talla acordada en ICES WGACEGG fue de 51.440t. Cuando se consideró en cambio la relación TS-talla utilizada por Ifremer, la estima de biomasa fue de 71.007t. La estima obtenida con esta metodología (71.007t) (Fig 6) se encuentra dentro de los límites marcados por la campaña MPDH (41.742t, cv: 0.2) y la campaña acústica (186.875t). Además la predicción de Juvena (Boyra *et al.,* 2013) de anchoa juvenil para 2012 fue de 54.047t. Esta es la anchoa de edad uno, considerada el 75% de la biomasa total (Uriarte *et al.,* 1996), lo que significa que la predicción de la biomasa total (72.062t) está muy cerca del resultado obtenido en este estudio (71.007t).

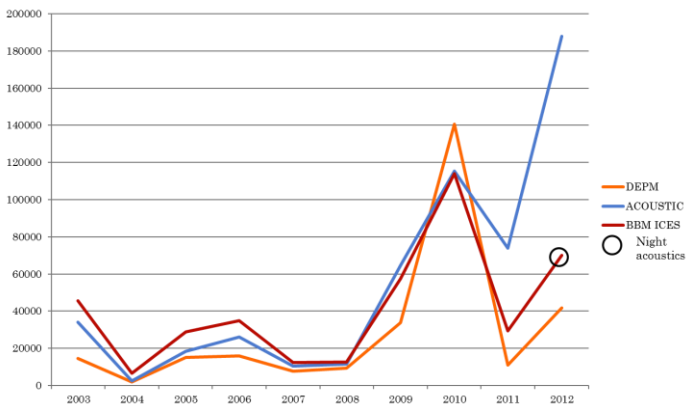



Fig 6. Estimas de biomasa de anchoa obtenidas por los distintos métodos del año 2012.

Los resultados preliminares obtenidos con esta metodología en la campaña del año 2012 han sido prometedores en comparación con la estima de abundancia obtenida por el modelo Bayesiano del ICES y las predicciones de reclutamiento de JUVENA. Los resultados muestran además coherencia entre los valores de abundancia de día y de noche.
Esta consistencia con las estimas de otras campañas confirma la hipótesis de este estudio: los datos acústicos grabados durante la campaña de MPDH pueden ser empleados para calcular una estima de la población de anchoa.
Sin embargo esta metodología necesita aún un proceso de refinamiento y validación. Una vez validado el método y comparado con una serie temporal de estimas de abundancia, la aplicación de este método abrirá puertas a un nuevo tipo de campañas: la campaña actual de huevos y pescas de arrastre será una campaña multidisciplinar que incluirá la acústica como herramienta, y la actual campaña acústica podrá realizarse 24 horas abaratando considerablemente los presupuestos correspondientes.

El resultado positivo de esta validación preliminar abre la posibilidad de emplear esta información en el futuro mejorando ciertos aspectos con respecto a la metodología actual:

- Las campañas de MPDH proporcionarían también estimas acústicas de biomasa. Además, dado que el registro de datos sería 24 horas, el tiempo de duración de las campañas podría verse significativamente reducido.

- La aplicación de esta metodología a los datos del 2012 pudo explicar las discrepancias entre los resultados de las campañas de anchoa de primavera contribuyendo a aumentar la fiabilidad del método Bayesiano empleado para la evaluación de la anchoa en el Golfo de Bizkaia.

## REFERENCIAS

Ballón M, Bertrand A, Lebourges-Dhaussy A, Gutiérrez M, Ayón, Grados D, Gerlotto F (2011) Is there enough zooplankton to feed forage fish population off Peru? An acoustic (positive) answer. Prog Oceanogr (in press) doi: 10.1016/j.pocean.2011.03.001

Boyra, G., Martínez, U., Cotano, U., Santos, M., Irigoien, X. and Uriarte A. (in press). Acoustic surveys for juvenile anchovy in the Bay of Biscay: abundance estimate as an indicator of the next year's recruitment and spatial distribution patterns. Accepted for publication in ICES Journal of Marine Science, in June 2013.

Doray, M, Massé, J, and Petitgas, P. 2010. Pelagic fish stock assessment by acoustic methods at Ifremer. Rapp. Int. Ifremer DOP/DCN/EMH 10- 02: 1–17. http://archimer.ifremer.fr/doc/00003/11446/

Edwards, J. I., and Armstrong, F. 1983. Measurement of the target strength of live herring and mackerel. FAO Fisheries Report, 300: 69–77.

Fernandes PG, Korneliussen RJ, Lebourges-Dhaussy A, Masse J and others (2006) The SIMFAMI Project: species identification methods from acoustic multifrequency information. Final Report to the EC, Q5RS-2001-02054

Foote KG, Knudsen HP, Vestnes G (1987) Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. ICES Coop Res Rep 144: 1−70

Foote KG. 1980b Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strength. Journal of the Acoustical Society of America, 67: 2084-2089.

Gorska, N., and Ona, E. 2003. Modelling the acoustic effect of swimbladder compression in herring. ICES Journal of Marine Science, 60: 548–554.

Haury LR, McGowan JA, Wiebe PH (1978) Patterns and processes in the time−space scales of plankton distributions. In: Steele JH (ed) Spatial pattern in plankton communities. Plenum Press, New York, NY, p 277−327

ICES. 2012.Report of theWorking Group on Southern Horse Mackerel, Anchovy and Sardine (WGHANSA). ICES Document CM 2012/ ACOM: 16.

Korneliussen R (2000) Measurement and removal of echo integration noise. ICES J Mar Sci 57: 1204-1217

Lezama-Ochoa A, Ballón M, Woillez M, Grados D, Irigoien X, and Bertrand A., 2011 Spatial patterns and scale-dependent relationships between macrozooplankton and fish in the Bay of Biscay: an acoustic study. Mar Ecol Prog Ser. 439:151-168

Mukai, T., and Iida, K. 1996. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. ICES Journal of Marine Science, 53: 245–248.

Olsen, K., and Ahlquist, I. 1989. Target strength of fish at various depths observed experimentally. ICES Document CM 1989/B: 53.

Ona, E., Svellingen, I., and Fosseidengen, J. E. 2001b. Target strength of herring during vertical excursions. ICES Fisheries Acoustic Science and Technology Working Group (FAST), Seattle, April, 2001: 1–16.

Ona, E. 2003. An expanded target-strength relation for herring. ICES Journal of Marine Science, 60: 493–499.

Santos M, Uriarte A and Ibaibarriaga L. Spawning Stock Biomasa estimates of Bay of Biscay anchovy (*Engraulis encrasicolus, L.) in 2012 applying the DEPM.* AZTI-Tecnalia, Instituto Tecnológico Persquero y Alimentario, Working Document to the ICES WGACEGG, 26-30

Stanton TK, Chu D, Wiebe PH 1996 Acoustic scattering characteristics of several zooplankton

groups. ICES J Mar Sci 53: 289−295

Urick RJ (1986) Ambient noise in the sea. Peninsula Publishing, Los Altos, CA

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ACOUSTIC BEACON FOR THE POSITIONING SYSTEM OF THE UNDERWATER NEUTRINO TELESCOPE KM3NeT

PACS: 43.30.+m; 43.35.+d; 43.38.+n; 43.58.+z; 43.60.+d

M. Saldaña; M. Ardid; I. Felis; C.D Llorens; J. A. Martínez-Mora
Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres (IGIC)
Universitat Politècnica de València (UPV)
46730 Gandia, València, España
E-Mail: masalcos@upv.es

## ABSTRACT

The design and development of an acoustic beacon as part of the positioning system for the underwater neutrino telescope KM3NeT is presented. Acoustic positioning system is used to monitor the position of the optical sensors of the telescope (with 10 cm accuracy over distances of about 1 km), in which the acoustic beacons are the active elements. The acoustic beacon is able to generate high-power short signals in a frequency range of 20-60 kHz, hence signal processing techniques can also be used to improve the performance of the positioning system.

## 1. INTRODUCTION

The Acoustic beacons have been developed to be part of the acoustic positioning system (APS) for the multi-cubic-kilometre underwater neutrino telescope KM3NeT located at the depths of the Mediterranean Sea. Currently, KM3NeT project is in its first construction phase, after the preparatory and design phases. At the end of this phase the detector will consists of 24 Detection Units (DUs) deployed off-shore in Capo Passero, Italy, (KM3NeT-IT) and 7 DUs, deployed off-shore in Toulon, France (KM3NeT-FR). Each DU hosts 18 digital optical modules (DOMs), each one equipped with 31 photo-multipliers tubes (PMTs) [1].
The KM3NeT telescope will detect neutrinos by measuring the Cherenkov light emitted by charged secondary particles produced in neutrino interactions with the sea water or the rock beneath. Since neutrinos interact so weakly, a huge volume of water must be observed to collect a sufficient number of such events. The direction of the incoming neutrino can be reconstructed with the telescope and its energy estimated. Accumulations of neutrino events pointing to particular celestial directions will establish the coordinates and characteristics of cosmic accelerators or other astrophysical neutrino sources.
During the telescope operation, in order to effectively reconstruct muon tracks, generated by the interaction of cosmic neutrinos with water nuclei, via the optical Cherenkov technique, the coordinates of the optical sensors must be known with an accuracy of about 10 cm. In the deep sea, DUs are anchored to the sea bed but they are free to move along their vertical expansion under the effect of currents, thus their positions must be determined and monitored. A long baseline (LBL) of acoustic transmitters placed on the seabed in known positions and an array of

acoustic receivers rigidly connected to the mechanical structures of the telescope will be used, therefore the optical sensor positions could be continuously calculated via triggered emission of acoustic signals. The distances from acoustic emitters and receivers of the line are of the order of 1 km, so acoustic signals emitted suffer a considerable attenuation.

## 2. LONG BASE-LINE (LBL) POSITIONING SYSTEM

The LBL positioning system of KM3Net is composed by an array of acoustic transmitters and receivers hosted on the DUs bases and on the Calibration Units bases (CBs). Each DU base will host a digital hydrophone, each CB will host an acoustic beacon and a digital hydrophone placed at known distance from the beacon. The LBL of the acoustic beacons installed on the CBs is complemented by an array of autonomous acoustic emitters (battery powered and driven by local clock) placed outside the footprint of the telescope, that improve the resolution of triangulation calculation for receivers placed on DU at the edge of the telescope field. Moreover, autonomous beacons must be used, during the installation of the first CBs, to create a temporary LBL field [2].

The positions of acoustic beacons, receivers and autonomous beacons must be geo-referenced during the deployment operation using GPS signal, available on board the ship that performs the deployment, with an accuracy of ±1 m. The main LBL system is time-synchronized and phased with the detector master clock. This allows the implementation of LBL auto-calibration and the possibility to accurately measure the Time of Flight (ToF) of acoustic signals emitted by each acoustic beacon to reach the acoustic receivers on DUs. The LBL acoustic beacons are reconfigurable by dedicated RS-232 bidirectional link between shore station and CU base electronics: acoustic emission signal parameters (amplitude, waveform, and timing) can be set for “in situ” optimization of the signal detection.

## 3. LBL ACOUSTIC BEACON

The acoustic beacon (MAB-100) developed by our group in cooperation with Mediterráneo Señales Marítimas SLL for the LBL positioning system is a broadband range acoustic emitter (20 kHz - 60 kHz) able to work at rating depths up to 400 bar in underwater environments. It provides the emission of short intense signals (Sound Pressure Levels of 180 dB re 1 µPa @ 1 m at 34 kHz) and has LBL functionality. The system is composed by a piezo-ceramic transducer and an electronic board integrated in an only piece system by a cylindrical hard-anodized aluminium vessel (Fig. 1) The transducer is a Free Flooded Ring (FFR SX30). The electronic board is specifically design to fulfil the positioning system requirements of the telescope, enabling the transducer communication and the signal emission control and amplification. It disposes of a serial interface communication via RS-232 for signal configuration from shore.



Figure 1. Acoubeacon MAB-100 device

### 3.1. AcouBeacon Piezo-Ceramic Transducer

The FFR SX30 acoustic transducers are able to work in the frequency range of 20 kHz to 50 kHz with transmitting voltage responses of 130 dB re 1 µPa/Volt @ 1 m at 30 kHz. The maximum input power is 300 W with 2% duty cycle. They are able to operate at very large depth, satisfactory tested up to 440 bar maintaining good stability. These transducers have an omnidirectional directivity pattern on the radial plane and a toroidal (60°) directivity pattern on the axial plane [3, 4].

In order to ensure the transducer holding and protection, the nude transducer is moulded with a polyurethane material joined to a BH2M hard-anodized aluminium connector as shown in Fig. 2. It is screwed into one side of the vessel and connected to the electronic board placed inside.

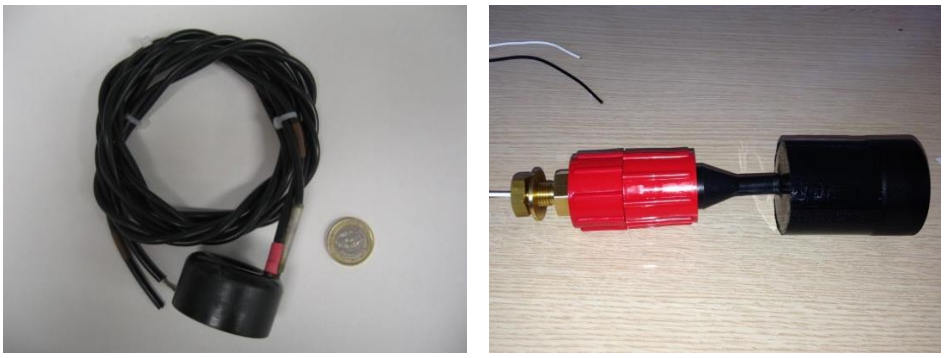


Figure 2. Nude (left) and molded (right) FFR SX30 Transducer

### 3.2. Acoustic specifications of the AcouBeacon

The *AcouBeacon* emits a Sound Pressure Level (SPL) of 180 dB re 1 µPa @ 1 m at 34 kHz with a variation of ± 6 dB in the frequency range of 20 kHz to 60 kHz. The radial beam pattern is omnidirectional with ± 2 dB for each work frequency and the axial beam pattern is toroidal with ± 10 dB of variation at 60º and ± 5 dB at 180º. The acoustic emission parameters are configured by commands through a RS-232 serial interface allowing signal reconfiguration from shore. There is a graphical interface for facilitating the user interaction. The signals parameters can be configured as following:

- Signal Emitted length: from 0 to 50 ms.
- Maximum emission amplitude: 180 dB @ 34 kHz re 1 µPa a 1 m.
- Type of acoustic signals:
  - Monochromatic signals configurable from 1 kHz to 80 kHz.
  - Sine Sweep signals configurable from 1 kHz to 80 kHz.
  - Maximum Length Sequence (MLS) signals with lengths from 5.12 ms to 40.96 ms (from 10th to 13th order and sampled at 200 kS/s).
- Modality of emission: external trigger response (LVDS with galvanic isolation). It disposes two operation emission modes; single and automatic (continue) emission.
- Variable temporal interval of emission between a signal and the successive one for the automatic emission mode from 0.5 s to 300 s.

The sound pressure level (dB re 1µPa@1m) of the acoustic beacon obtained with different capacitor charge (5V, 20V, 40V and 60V) is shown in Figure 3, in both radial and axial directions. Figure 4 shows the *AcouBeacon* directivity at axial direction.

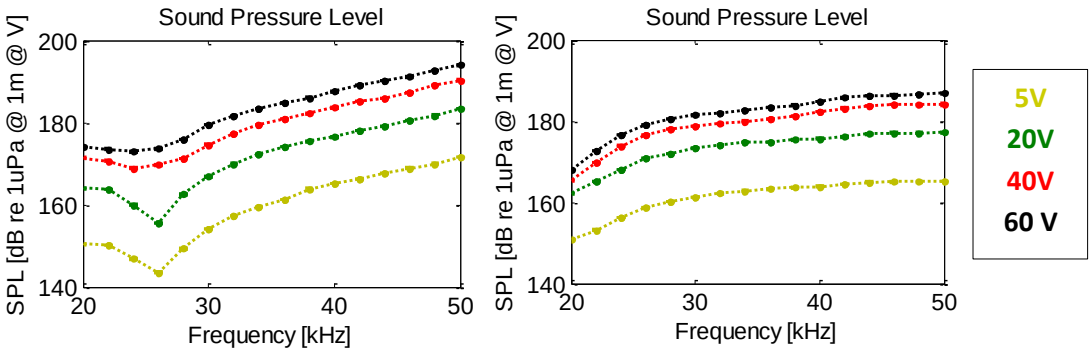



Figure 3. Sound Pressure Level (SPL) of the Acoubeacon at axial direction (left) and radial direction (right) for different capacitor charge.

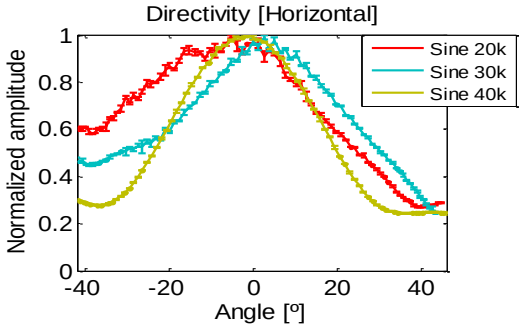



Figure 4. Directivity of the Acoubeacon

Positioning acoustic pulses will be emitted in the range of frequencies from 20 kHz to 50 kHz. In this range acoustic signals emitted in water with a SPL of 180 dB re 1 µPa at 1 m can effectively propagate until a distance of 2 km with about 110 dB re 1 µPa (depending on frequency) and it can be easily recognised by the acoustic receivers of the telescope.

### 3.3. Electronic specifications of the Acoubeacon

The *Beacon Board* has been carefully designed to accomplish all the positioning requirements, as well as, to optimize and amplify the signal power emission [5]. The board is piloted by a dedicated electronics integrated at the base of the Calibration Units (CBs) that provides the bidirectional link to shore; this enables emission signal reconfiguration for 'in situ' signal detection optimization. Acoustic waveforms to be emitted are stored in a local memory that can be updated from shore via RS-232 link. The signal emission trigger is received from the CB electronics, synchronized with the detector master clock. The time synchronization and calibration with respect to the detector master clock is accurate and stable. The technical specifications of the Acoubeacon electronics are described in Table 1.

| | |
|---|---|
| **Supply Voltage** | 12 V |
| **current consumption** | 250 mA |
| **Communications** | Serial Port RS-232. Baud rate 9600, 8bits No parity 1 stop bit |
| **Trigger Signal** | Differential 1Vpp galvanic isolated Accuracy >±1µs |
| **Emission Latency** | <10 µs |
| **Synchronization accuracy** | <1 µs |
| **Dimensions** | Three boards (240x70mm all) |
| **Lifespan** | >=20 years |

Table 1. Electronic specifications of the Acoubeacon for the LBL.

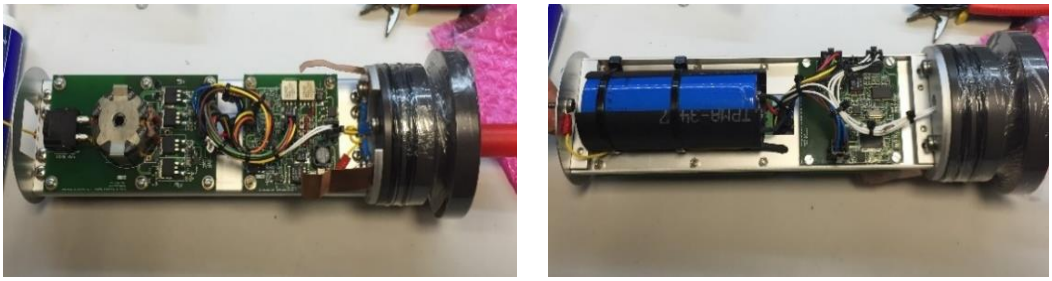


Figure 5. Acoubeacon Board

The electronic beacon board consists of three boards (Fig. 5): In the block diagram the yellow part is related with the DsPIC Board, the orange part related to the Supply Board and the red one to the Bridge Board.

The DsPIC Board has the main DsPIC processor that generates the PWM signal for the class D amplifier, a RS-232 isolated driver to receive the configuration commands protecting the supply of the telescope from emission noise, a galvanic isolated differential trigger reception to synchronize the emission of the beacon, a flash memory to store configuration and signals, and a temperature and humidity sensor to check the internal vessel status. The DsPIC board can also be connected to an external RS485/MODBUS pressure and temperature sensor that can check the external vessel conditions.

The Supply Board receives the 12 V external supply and uses it by means of a common mode filter and a current limiter that protects the telescope supply from noise and inrush current. After this protection the board has two DC-DC converters; one to feed the DsPIC board with 5 V and the other to provide 60 V for the emission. The 60 V are used to charge/discharge the main capacitor in the Bridge Board using a constant current source and a constant current sink. The main capacitor is charged slowly up to the desired emission voltage which is read from the main DsPIC using an ADC input.

Finally, the Bridge board consists of a power Mosfet H Bridge which amplifies the PWM signal that comes from the DsPIC using the energy stored in the main capacitor. The H Bridge is coupled to the transducer through a transformer that reduces the impedance.

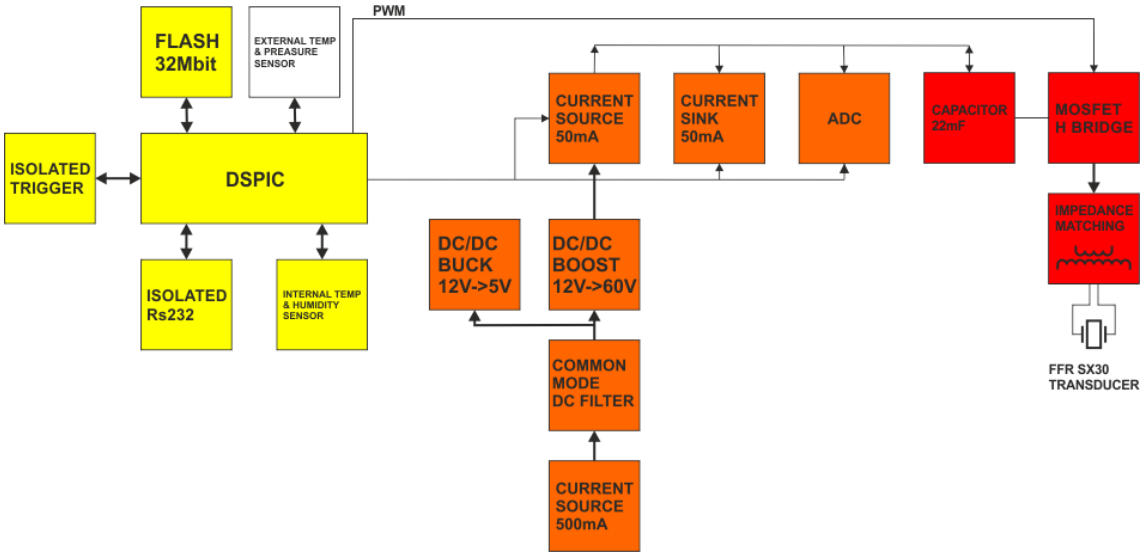



Figure 6. Block diagram of the electronic board

### 3.4. Mechanical specifications of the AcouBeacon

The AcouBeacon mechanical assembly consists of a cylindrical pressure vessel with a transducer screwed on the front endcap and hold firmly with a clamp (Fig. 7). The total length of the system is 575 mm; 400 mm length of the vessel including connector and 175 mm length of the complete transducer. The pressure vessel is a sealed system that contains the internal electronics in a secure environment, it isolates the electronics from external pressure and water and keeps them in proper humidity conditions. It is able to safely support pressure levels up to 400 bars.

The pressure vessel is composed of a closed aluminium hull and two removable endcaps with collar hulls and a light inner chassis where the electronic board is located. The endcaps have double O-ring seals to ensure sealing and closing by collar hulls. There are entries on both end caps of the vessel; one in the rear endcap for the passage of the power supply to the electronic board, using a Seacon Microwet MC-BH-6M hard-anodized aluminium connector, and one on the front endcap for the acoustic transducer connection to the board through a BH2M hard-anodized aluminium connector. The vessel material is hard anodized aluminium L6082-T6 of 60 microns and the hardware used is AISI316 (A4).

The acoustic transducer FFR SX30 is located in the front of the vessel conveniently moulded to cable signal using a polyurethane mould. The moulded transducer joint is subject to the vessel by means of a plastic (Arnite) clamp that guarantee the correct stability and strength of the issuer, without affecting the acoustic properties of the transducer, especially the directivity.

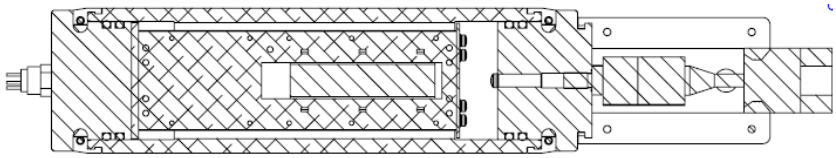


Figure 7. Drawing of the Acoubeacon, internal mechanical structure.

## 4. SIGNAL PROCESSING TECHNICS FOR DETECTION OPTIMIZATION

Protocols and post-processing techniques have been developed for the correct detection of the signals used for the positioning system. The distance from the emitters and receivers can be of the order of 1-2 km, therefore acoustic emitted signals suffer a considerable attenuation and arrive to the acoustic receivers of the detection units with a low signal to the environmental noise ratio. The noise masks the signal making its detection and the accurate knowledge of its arrival time a difficult goal [6].

The time of arrival (ToA) is determined by the difference between the emission time and the initial time of the receiving signal. The receiving time is obtained by two different methods: the threshold method used for sine signals mainly and the cross-correlation method of the received signal used mainly for the broadband signals: sine sweep and maximum length sequence (MLS) signals [7].

The threshold method determines the initial time of the received signal by taking a rise time value of the received signal envelope after applying a band-pass filter centred in the frequency of the emitted signal. The cross-correlation method determines the arrival time of the received signal by taking the interval of time corresponding to the maximum peak of the cross-correlated signal with the expected emitted signal. This technique is more favourable for broadband signals (sweeps and MLS) because they have a narrower correlation peak and consequently the mean peak is easier to discern than the other peaks. Figure 8 shows a tone, a sweep and MLS received signals with a distance of 112.5 m between emission and reception (E-R) in some measurement tests made in Gandia's harbour. On the top, the receiving signals in time domain after applying a high order band pass filter are shown (the original recorded signal in time is noisy so the receiving signal is masked). On the bottom, it can be seen the cross-correlation of each signal (without prefiltering) where direct signal reflections are easier and more effective to discern that working

in the time or frequency domain, especially for the broad bandwidth signals (narrower auto-correlation peak).

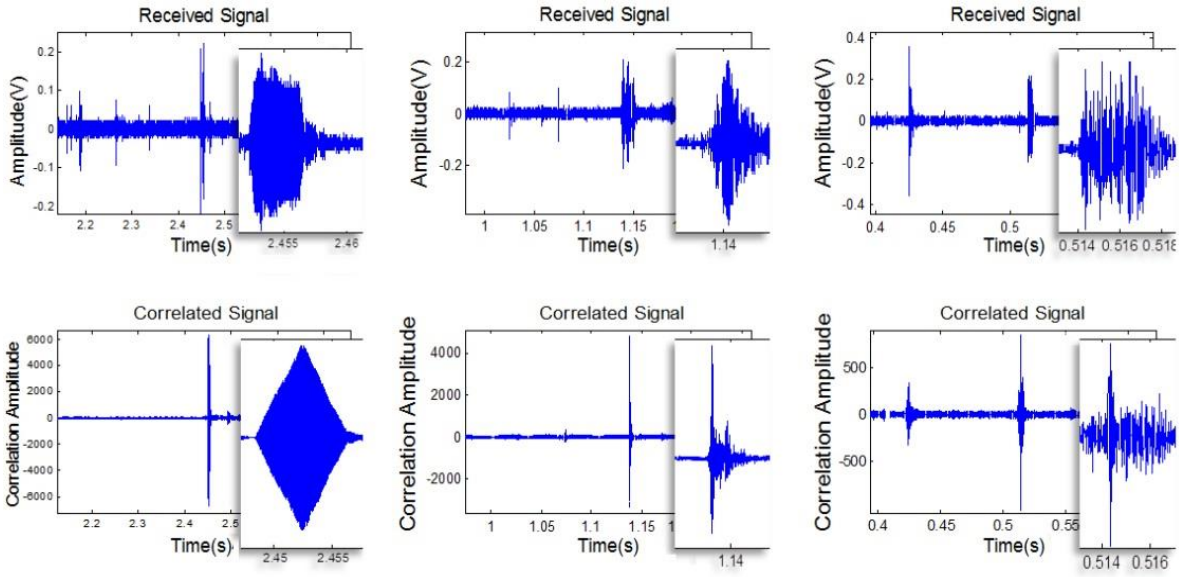



Figure 8. Example of recorded signals at 112.5 m E-R in the harbour of Gandia.

In situ test with the first's acoustic beacon prototypes have been performed in the neutrino telescope infrastructures installed in Capo Passero (NEMO) [8] and in ANTARES site [9, 10]. The emitted signals were sine signals of 20 kHz, 30 kHz and 40 kHz, sine sweep signals from 20 kHz to 48 kHz and from 28 kHz to 44 kHz, and MLS signal.

The data recorded in NEMO tower test (3500 m depth) was taken by hydrophones from all floors of the tower in which the emitter is located on the base. The distance from emitter to the first floor is about 100 m and between floors is around 40 m and the line has a total of 8 floors with two hydrophones per floor. As an example of the ToA obtained at the NEMO test, Fig. 9 shows the ToA obtained from the sine sweep signal from 20 kHz to 48 kHz applying the cross-correlation method. Table 2 shows the stability of the ToA values obtained from all hydrophones per signal.

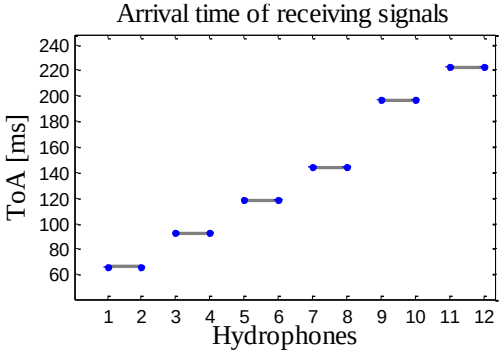



Figure 9. Time of arrival (ms) with the 20 kHz- 48 kHz sine sweep.

| | THRESHOLD METHOD | CORRELATION METHOD |
|---|---|---|
| SIGNAL | SIGMA [ms] | SIGMA [ms] |
| Sine 20 kHz | 0.065 | 0.103 |
| Sine 30 kHz | 0.031 | 0.046 |
| Sine 40 kHz | 0.029 | 0.029 |
| Sweep 20kHz48kHz | | 0.027 |

Table 2. Stability of ToA values from all hydrophones per signal.

The results of the tests performed in situ show that the time of arrival obtained matches with the expected distances from the emitter to the hydrophones, as well as, a good stability is obtained.

The signal to noise ratios obtained by using the filter and threshold in time and cross-correlation methods to determine the amplitude; are shown in Fig. 10 for a distance between the emitter and receiver of 180 m.

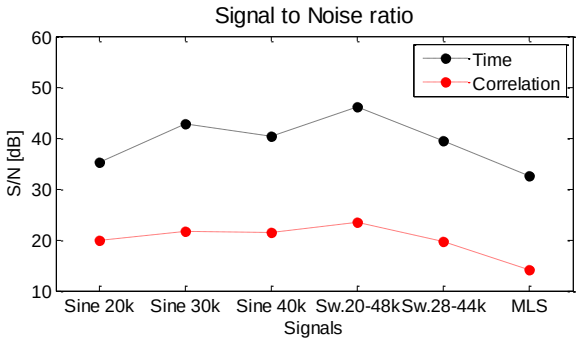



Figure 10. S/N ratio both in cross-correlation and time domain method.

Figure 10 shows that using the cross-correlation method is possible to obtain accurately the signal amplitude and getting an increase of between 15 and 20 dB in the S/N ratio, with a consequent improvement in the acoustic detection.

## 5. CONCLUSIONS

The acoustic beacon developed satisfies all the requirements for the KM3NeT-LBL acoustic positioning system. The beacon works properly in terms of functionality, matching, operation modes, signal configuration and power emission. The tests and calibration performed show stable and favourable results.

From the study of the signal processing technics with the analysis realized from the different measures performed in situ, we can conclude that by using the cross-correlation method with broadband signals (sweeps and MLS) the signal detection is optimized; it enlarges the S/N ratio improving the arrival time detection and its accuracy.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by the Ministerio de Economía y Competitividad (Spanish Government), project ref. FPA2012-37528-C02-02, by Generalitat Valenciana, projects ACOMP/2015/175 and PrometeoII/2014/079, by the project Multidark (CSD2009-00064), and the European FEDER and 7th Framework Programmes, Grant no. 212525. Thanks to KM3NeT, ANTARES, and NEMO/SMO Collaborations for the help.

## 7. BIBLIOGRAPHY

[1] The KM3NeT Collaboration, KM3NeT Technical Design Report (2010) ISBN 978-90-6488-033-9, available on www.km3net.org.
[2] S. Viola (KM3NeT Collaboration) in proceedings of 34th ICRC. PoS (ICRC2015)1169 (2015)
[3] M. Ardid et al., Sensors 12 (2012) pp. 4113-4132.
[4] G. Larosa et al, Nucl. Instr. and Meth. A 725 (2013) 215–218.
[5] C.D. Llorens et al, J. Instrum. 7 (2012) C01001.
[6] S. Adrián-Martínez et al., MARSS (2014). arXiv:1502.05038 [physics.ins-det]
[7] M. Saldaña et al., Elsevier, Physics Procedia, vol. 63 (2015) pp. 195-200
[8] S. Viola et al., Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 725 (2013) pp. 207-210.
[9] M. Ageron et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2011), vol. 656, pp. 11-38.
[10] M. Ardid, Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 602 (2009) pp. 174-176

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SALAS CAPITULARES. AUDITORIOS MEDIEVALES

PACS 43.55.JZ

Genaro Gonzalez Baixauli
Universitat Rovira i Virgili
Avinguda Països Catalans n.26. DEM. 43007. Tarragona
Telf: 977 558 265
Fax: 977 559 691
E-mail: genaro.gonzalez@urv.cat

## ABSTRACT

The importance of the acoustics in the conference rooms and auditoriums is not a current requirement. Chapter Houses of the monasteries exercised this role with the needs for a controlled acoustics. We presents an acoustic study of these stays of the Cistercian monasteries of Tarragona, which demonstrate a deep sound knowledge in the construction and design, adapting the sound to their needs.

## RESUMEN

La importancia de la acústica en las salas de conferencia y auditorios no es un requerimiento actual. Las Salas Capitulares de los monasterios ejercían este rol con la necesidad de una acústica controlada. Se presenta un estudio acústico de estas estancias de los monasterios cistercienses de Tarragona, que revela un conocimiento acústico notable en la construcción y diseño de las mismas que adapta su acústica al uso requerido.

## TOMA DE DATOS

La toma de datos se ha realizado con los recintos vacíos.

Las mediciones de ruido de fondo se han obtenido mediante sonómetro configurado en el modo de bandas de octava, durante un período de aproximadamente 6 minutos.

Para los valores dependientes del tiempo de reverberación se han adecuado a lo exigido por la norma UNE-3382. Para valores experimentales del tiempo de reverberación ($T_{30}$, $T_{20}$), tiempo de caída inicial (EDT), claridad musical (C80), claridad (C50), definición de la palabra ($D_{50}$) y tiempo central ($T_s$)se han obtenido a partir de las respuestas al impulso producido al excitar los recintos con señales sinusoidales de barrido logarítmico en frecuencia mediante .

Dichas señales se han emitido mediante dos tipologías de fuentes sonoras, unidireccional y omnidireccional dodecaédrica, conectadas a un amplificador de potencia y se han captado mediante micrófono. El equipo se completa con una tarjeta de sonido de 2 canales de alta con entrada USB.

Los datos obtenidos se han comparado con los valores recomendados actualmente para los usos de cada estancia. Se han utilizado los baremos reconocidos internacionalmente por la comunidad científica así como los postulados de investigadores más relevantes en temas acústicos.

Estos resultados comparativos nos ofrecen una interesante visión de la arquitectura cisterciense desde la perspectiva de la acústica.

## ARQUITECTURA

Las salas capitulares son las estancias donde se celebraba el capítulo (reunión de monjes) a diario bajo la dirección del abad. Los monjes se situaban alrededor de la estancia, colocados según su grado de importancia. En esta reunión se distribuían las actividades del día, se confesaba públicamente las faltas cometidas por cualquier miembro de la comunidad y se exponían los problemas o proyectos que el abad quisiera comunicar.

Arquitectónicamente se trata de salas amplias, de forma cuadrangular, cubiertas con bóvedas de crucería sustentadas sobre cuatro columnas centrales y sobre mensuras adosadas a los muros. Se sitúan en la panda este de los claustros, siendo su acceso mediante una portada, flanqueada por dos ventanales que permiten la visión desde fuera. En la parte externa de estos ventanales se situaban los novicios, que podían de esta manera asistir al capítulo, sin participar en el, pues solo cuando se convirtieran en monjes, podrán situarse en la parte interna de la estancia y participar en las reuniones. En la pared del fondo se suelen situar ventanas que proporcionan luz adicional a la estancia además de la que procede del claustro.

La sala capitular del monasterio de Santes Creus, mantiene su pureza primitiva, con el banco corrido de piedra y las conexiones al claustro completamente abiertas. En cambio, Poblet, debido a que es un monasterio habitado se ha acondicionado el banco perimetral forrando las gradas con paneles de madera. Su condición de monumento Patrimonio de la Humanidad, ha obligado a actuaciones de control y seguridad, así la sala capitular ha perdido la abertura directa al claustro debido al cierre acristalado del acceso y los ventanales laterales.

Estas diferencias arquitectónicas pueden influir en la respuesta acústica de las estancias.

En la tabla 1 se detallan las dimensiones arquitectónicas de las salas capitulares a estudio.

| Salas capitulares | Volumen | Superficie | Longitud (media) | Anchura (media) |
|---|---|---|---|---|
| POBLET | 1.217 $m^3$ | 234,05 $m^2$ | 15,21 m | 15,38 m |
| SANTES CREUS | 560,73 $m^3$ | 128,80 $m^2$ | 11,20 m | 11,51 m |

Tabla 1. Dimensiones arquitectónicas de las Sala Capitulares de S. Creus y Poblet

## RUIDO DE FONDO

Es interesante estudiar el nivel de ruido de fondo en la salas capitulares, ya que se trata del espacio donde los monjes leían el capítulo y se dictaban las normas de la comunidad por parte del Abad desde su cátedra, situado en el centro del paramento opuesto al acceso de la

estancia. El silencio estricto de la comunidad durante el capítulo era perceptivo según la Regla Bernardina. Así pues, el valor del nivel de ruido de fondo es importante para el buen desarrollo de la actividad en la sala.

En la figura 1 se representan los resultados de NR obtenidos para los puntos situados en las esquinas de la sala como representantes de las ubicaciones posiblemente más desfavorables por reverberación.

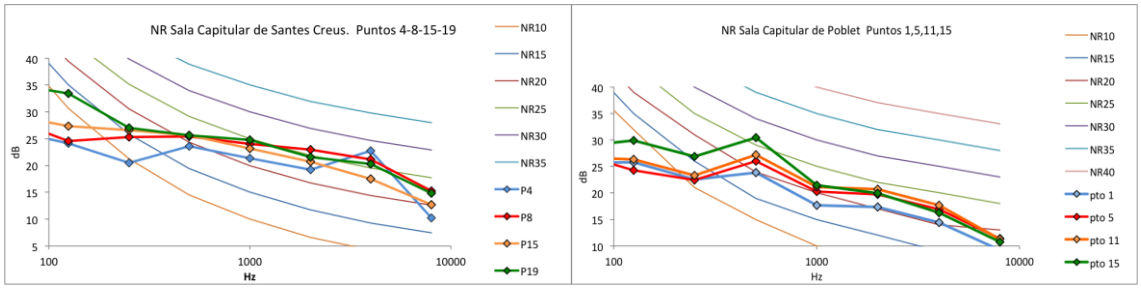



Figura 1 – Curvas NR. Salas Capitulares de Santes Creus y Poblet

Los puntos estudiados responden homogéneamente, con valores y pendientes similares para frecuencias medias y altas. Los valores obtenidos se sitúan en sobre las curvas NR20-25, parámetros recomendados para uso de sala de conferencias o de iglesia. Estos resultados son incluso más restrictivos que los exigidos a la sala para su uso primitivo, validando a esta arquitectónicamente.

Si realizamos la comparativa de medias ponderadas entre salas, las curvas resultantes se asemejan, siendo la sala capitular de Poblet la que presenta valores con menor ruido de fondo, debido al aislamiento acústico que le proporciona el acristalamiento de la conexión con el claustro, mientras que en Santes Creus, los ruidos producidos en el suyo si repercuten directamente en la sala.

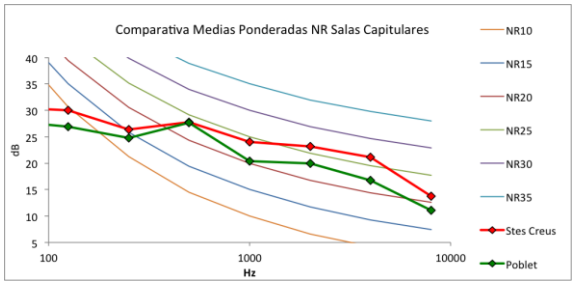



Fig.2 Comparativa valores medios NR. Salas Capitulares de Stes, Creus y Poblet

## PARÁMETROS ACÚSTICOS

La comparativa validable para los parámetros acústicos de nuestras salas, la suponemos frente a los parámetros actuales de diseño de espacios con uso de teatro o sala de ópera, valores reconocidos internacionalmente y siempre más restrictivos que los requeridos al uso supuesto

a los espacios cistercienses a estudio [1]. Estos parámetros se suponen con recintos llenos y nuestras mediciones se han realizado con las estancias vacías.

Santes Creus ofrece mejores resultados que Poblet, debido a la pureza del espacio de la sala capitular, sin modificaciones ni adecuaciones. Posiblemente el espacio abierto y el material homogéneo de la sala ayuden a su mejor acústica. Así se obtienen unos resultados dentro del rango aconsejable, incluso con la sala vacía. En cuanto al brillo, los valores obtenidos se aproximan a los mínimos recomendados. En el caso de Poblet, sin cumplir ningún parámetro se obtienen valores cercanos a los aconsejables para calidez y brillo. (tabla 2)

Esta comparativa, nos presenta unas salas que cumplirían con la mayoría de los actuales parámetros de diseño. Recordemos que estos valores son comparados con los exigidos actualmente para teatros y salas de opera con recinto lleno.

Estos resultados indican la buena audición de la sala para frecuencias graves, comparables al modo de lectura y oratoria suntuosa de los monjes cistercienses. El diseño simétrico favorece una buena audición en cualquier ubicación de la grada perimetral.

| Uso Teatro o Sala de Opera | Santes Creus | | Poblet | |
|---|---|---|---|---|
| | Dato Obtenido | Cumplimiento recomendación | Dato Obtenido | Cumplimiento recomendación |
| $RT_{mid}$ (s) | 2,84 | NO | 4,08 | NO |
| EDT (s) | 2,70 | SI | 3,99 | SI |
| C50 (dB) | -5,26 | NO | -10,56 | NO |
| C80 (dB) | -2,66 | SI | -6,68 | NO |
| D50 (%) | 24,66 | SI | -11,38 | NO |
| BR | 1,22 | SI* | 0,94 | NO* |
| Br | 0,69 | NO* | 0,76 | NO* |

Tabla 2. Comparativa del cumplimiento de los parámetros acústicos de las Salas Capitulares de Stes Creus y Poblet. Frecuencia 1kHz

## MODELOS TEORICOS

Los valores obtenidos para el parámetro que nos pondera la claridad de la voz, se adaptan a la curva teórica. Para cualquier ubicación de los monjes en el perímetro de la Sala Capitular, la claridad de la palabra del Abad seria óptima.

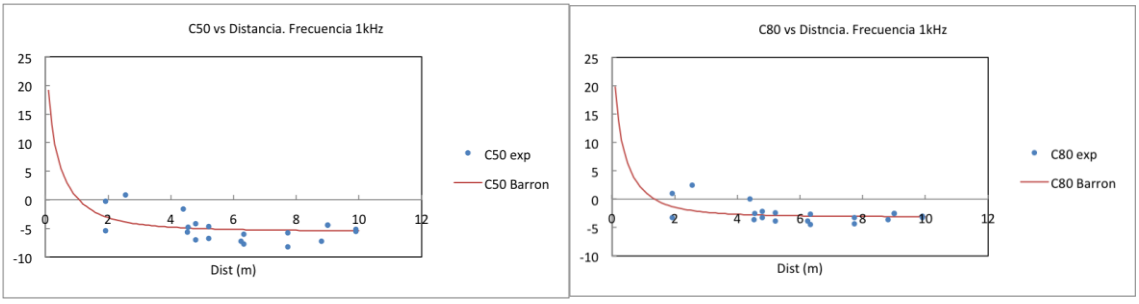



Fig 3. Comparativa valores C50 C80 experimentales y teóricos para frecuencias de 1kHz. Sala Capitular. Santes Creus

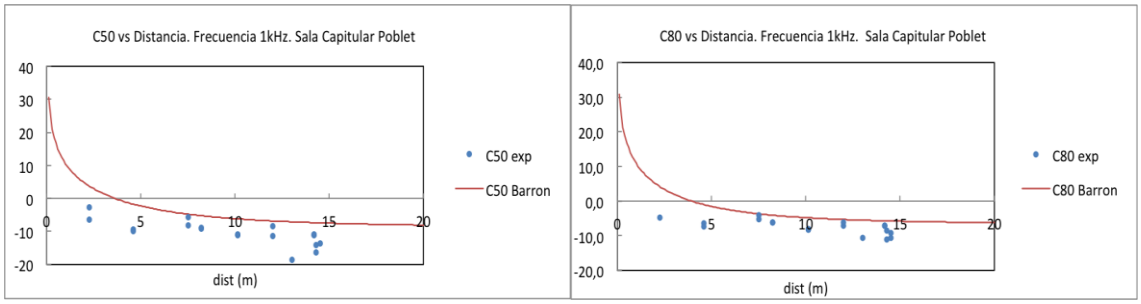



Fig 4. Comparativa valores C50 C80 experimentales con los teóricos para frecuencias de 1kHz. Sala Capitular. Poblet

Los valores de C80 son casi coincidentes con los teóricos, a excepción de los puntos situados a los lados de la cátedra del Abad. La dispersión de los puntos cercanos a la fuente influenciados por la geometría de la sala ya ha sido sugerida por Chiles [2] y Cirilo [3].

Los valores que nos indican el nivel de definición de la palabra D50, tienden a la curva teórica a excepción de los puntos cercanos a la fuente sonora, de modo parecido a lo obtenido para C80.

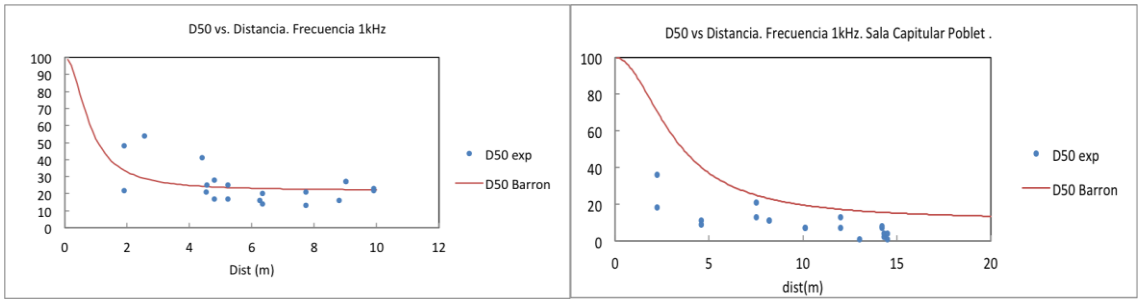



Fig 5 . Comparativa valores D50 experimentales con los teóricos para frecuencias de 1kHz. Salas Capitulares. Santes Creus (izquierda) y Poblet (derecha)

La respuesta a los modelos teóricos de Barron de ambas salas es muy semejante. Los valores obtenidos para C50 y C80 se adaptan a las curvas teóricas. En el caso de Poblet, los puntos cercanos a la cátedra del Abad presentan un desfase con los valores ideales.

De igual manera sucede con los resultados referentes la definición y tiempo central. La sala capitular de Santes Creus presenta mejores resultados que la de Poblet. Aunque ambas no se acerquen a los resultados ideales en los puntos cercanos a la fuente sonora, Santes Creus se adapta a la curva ideal de Barron a partir de los 4m de esta y Poblet a partir de los 8m. Funcionalmente representa que por muy desfavorables que fueron las condiciones sonoras de la sala, únicamente los monjes situados a ambos lados del Abad no disfrutarían de una acústica ideal.

## CONCLUSIONES

En general, con los datos obtenidos, se intuye que el espacio cisterciense se adecua a la acústica que se le supondría actualmente. Un espacio de reunión donde el habla desde un punto concreto debe llegar con claridad al perímetro de la misma. La simetría de la sala y su estructura abovedada ayuda a la difusión correcta del sonido y se adecua para obtener unos buenos rendimientos para la claridad de la voz que se refleja en los resultados obtenidos.

Las premisas de diseño arquitectónico del recinto monacal cisterciense, tanto en funcionalidad como espacial, sin duda fueron un reto al que se debieron enfrentar los monjes y constructores de la época.

La adecuación total del ruido de fondo de las estancias al uso que se le supone, pone en relevancia la importancia del silencio para la Regla benedictina. En la comparativa realizada de los valores experimentales y criterios recomendados actualmente, los primeros están siempre en el rango específico para el uso de cada sala.

Con unas dimensiones y diseño arquitectónico muy similar, las modificaciones realizadas en Poblet, repercuten en su comportamiento acústico, aunque el resultado final no difiere sustancialmente entre ellas. El cerramiento acristalado en los accesos a la sala capitular de Poblet supone un menor ruido de fondo en ella. Aun siendo mejor *imput* objetivo, la esencia de la acústica del espacio se pierde totalmente. La conexión acústica entre el claustro y la sala capitular, proporciona una riqueza sensorial al espacio que se pierde en Poblet. Este aspecto repercute igualmente en valores como la calidez o la definición, en la comparativa para el diseño de salas de música, que resultan aceptables en Santes Creus y no en Poblet.

Parece plausible que el conocimiento acústico de monjes benedictinos, y de sus maestros de obra, fuera bastante profunda y que diseñaran arquitectónicamente cada recinto para la mejora de la acústica dependiendo del uso que este tuviera. Algunas investigaciones avalan este aspecto, teorizando sobre la adecuación del espacio a la cadencia de la forma de recitar y del único tipo de música permitido [4][5], el canto llano y posteriormente el gregoriano.

## REFERENCIAS

[1] BERANEK, Leo. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer, NY: Springer, 2nd edition, 2004.

[2] CHILES, S. and BARRON,M., “Sound level distribution and scatter in proportionate spaces,” J. Acoust. Soc. Am. 116 3, 1585–1595, 2004.

[3] CIRILLO, E. and MARTELLOTA,F., “Sound propagation and energy relations inchurches,” J. Acoust. Soc. Am118.1, 232–248, 2005.

[4] SANTON, F. “L’acoustique des églises: exemple de quelques abbayes provençales”. Conférences des journées d’études du festival international du son. Paris, 1976.

[5] MAGRINI, A., RICCIARDI, P., “An Experimental Study On Acoustical Parameters In Churches”, International Journal of Acoustics and Vibration, vol. 7, n.3, 2002.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# SIMULACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL FACTOR DE MERITO GLOBAL EN AULAS UNIVERSITARIAS EN FUNCIÓN DE SU GRADO DE OCUPACIÓN

REFERENCIA PACS:43.55

Autores: Sanchis Mullor Francisco; LLopis Reyna Ana; Guillén Guillamón Ignacio; Gómez Lozano Vicente

Institución: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Camino de Vera s/n. CP:46020.VALENCIA.963877522. frasanm1@arqt.upv.es

## ABSTRACT

The acoustic conditioning is one of the main requirements for all rooms used for speeches and conferences. For example, recently researches focus on the study and improvement for both reverberation and speech intelligibility inside classrooms. This paper proposes the usefulness of applying the Global Merit Factor (FMG) to the acoustic characterization of university classrooms. Through its application it is possible to study not only the parameters of decay, energy, space and intelligibility; but also the changes caused by the students according to their degree of occupation inside the classroom.

## RESUMEN

El acondicionamiento acústico es uno de los principales requerimientos de todo recinto destinado al uso de la palabra. Sirvan como ejemplo investigaciones recientes centradas en el estudio y mejora de la reverberación o la inteligibilidad del habla en el interior de las aulas. En este sentido, el presente trabajo propone la utilidad de aplicar el Factor de Mérito Global (FMG) en la caracterización acústica de aulas universitarias. Mediante su aplicación se pretende estudiar no sólo los parámetros de decaimiento, energéticos, espaciales o de inteligibilidad; sino también las modificaciones introducidas por los estudiantes en función del grado de ocupación del aula.

## 1 INTRODUCCIÓN:

El estudio pormenorizado de diversos parámetros acústicos que caracterizan el comportamiento de un aula, permite obtener conclusiones en base a distintos criterios tales como de decaimiento del sonido, energéticos, de inteligibilidad, etc. Sin embargo, un análisis global de estos parámetros resulta también de gran utilidad, puesto que además de proporcionar un valor global, permite identificar cuáles son aquellos parámetros susceptibles de mejorar acústicamente el comportamiento del aula. Para tal fin, el presente trabajo ha utilizado el Factor de Mérito Global (FMG) introducido por Higini Arau.[1] con el fin de evaluar el comportamiento acústico de un recinto. Recientes trabajos, reafirman no sólo la conveniencia de reducir los niveles de reverberación en el interior de aulas universitarias, sino también la necesidad de tener en cuenta otros parámetros como el STI o la Definición ($D_{50}$) y de obtener un punto intermedio en el que además de controlar la reverberación se obtengan altos niveles del habla.[3,6]

Así pues, si bien la utilidad del FMG resulta obvia para estudiar globalmente el comportamiento acústico de un aula, conviene reseñar que este factor no es aplicado a salas en vacío, puesto que analiza el comportamiento del recinto teniendo en cuenta la audiencia para la que ha sido diseñado. En este sentido la incidencia de la ocupación y más concretamente la presencia de alumnado en el interior de las aulas ha sido estudiada en investigaciones previas, las cuales recogen variaciones de un 50% en términos de reverberación, en función de que el aula se encuentre vacía u ocupada.[10] Sin embargo, tal y como apuntan los primeros estudios en torno a espacios universitarios, el efecto del alumnado sobre el comportamiento acústico de un aula no puede ser considerado homogéneo; sus efectos dependen no sólo de la geometría, sino también del nivel de ruido y del tratamiento absorbente de la propia aula.[7,8]

No obstante, a pesar de las diferencias contrastadas en diversas publicaciones, a nivel normativo es posible encontrar recomendaciones y criterios acústicos, tanto en el propio CTE como a nivel internacional, que no tienen en cuenta el nivel de ocupación del recinto. Tal y como muestra la tabla 1, el TR se define en función de la tipología o el volumen del aula, pero no se contempla ninguna variación en función del grado de ocupación del aula.

| NORMATIVA | TIPOLOGIA DE AULAS | TR (s)* |
|---|---|---|
| Building Bulletin BB93 | Escuelas de Enseñanzas medias | <0.8 |
| | Salas de conferencias (>50 personas) | <1 |
| ANSI S12.60 | Aulas de Volmen < 283 m3 | <0.6 |
| | Aulas de 283 m3< Volumen ≤566 m3 | <0.7 |
| (CTE-DBHR) | Aulas y salas de conferencias vacías(V < 350M3) | <0.7 |
| | Aulas y salas de conferencias vacías, pero con butacas fijas (V < 350M3) | <0.5 |

**Tabla 1: Valores máximos del Tiempo de Reverberación (*TR promedio de 500Hz, 1000Hz y 200Hz)**

Así pues atendiendo a la necesidad y la conveniencia de tener en cuenta la presencia del alumnado, se ha optado por utilizar las simulaciones acústicas con el fin de prever el comportamiento de un aula, sin necesidad de postergar su estudio hasta que ésta se encuentre ocupada. En consecuencia, se pretende reproducir en un modelo virtual las aulas estudiadas, de modo que sea posible incorporar en éste la audiencia para la cual se ha diseñado la sala. De este modo, la posibilidad de simular un aula en vacío o en estado de total ocupación permitirá no sólo evaluar los cambios asociados a la presencia del alumnado, sino también la posibilidad de plantear en fase de proyecto las mejoras acústicas que resulten necesarias.

## 2 OBJETIVOS:

.- Estudiar el comportamiento acústico de las aulas universitarias aplicando el FMG.

.- Construir y ajustar los modelos de simulación acústica de manera que sea posible implementar en éstos la presencia del alumnado previsto en cada caso.

.- Analizar las variaciones introducidas en cada aula por la presencia del alumnado.

.- Obtener un factor de mérito experimental (*FMG $_{exp}$ ) que permita evaluar el comportamiento previsto para el aula ocupada sin necesidad de utilizar las simulaciones acústicas.

## 3 METODOLOGÍA:

La metodología empleada en el presente trabajo puede subdividirse en 3 fases claramente diferenciadas. Primeramente se ha llevado a cabo la medición de los principales parámetros acústicos de las aulas estudiadas, así como la toma de datos relativa a las características geométricas y los materiales de acabado que configuran la envolvente interior de las salas.

### 3.1 Medición y recogida de datos

Las mediciones acústicas se han llevado a cabo utilizando el programa DIRAC 7841 de Brüel & Kjær. Por su mayor precisión e independencia del ruido de fondo en comparación con otras técnicas el método escogido ha sido el de barrido sinusoidal, también conocido como “Sweep [9] En lo referente al emplazamiento de la fuente y los receptores, se ha escogido la ubicación de la fuente emisora, de forma que su posición fuera asimilable a la de un orador situado en el centro de la parte delantera del aula, a una distancia mínima de 1 metro con respecto al cerramiento posterior y a 1,50m. de altura. Con respecto a la distribución de los receptores, ésta se ha realizado atendiendo a la simetría longitudinal de las aulas estudiadas; suponiendo por tanto que el comportamiento acústico del área estudiada se corresponderá con el que obtendríamos al estudiar la otra mitad de la sala. De este modo, en el lugar destinado a un oyente sentado se ha emplazado un micrófono a 1.20m. de altura sobre el nivel del pavimento. Con respecto a las condiciones de ocupación y ruidos de fondo, todas las mediciones se han llevado a cabo con las aulas completamente vacías aunque en periodos lectivos, de modo que ambas escuelas se encontraban ocupadas en todo momento por el alumnado correspondiente.

Una vez terminada la fase de medición, el proceso de análisis se ha completado con la exportación y tratamiento de los datos obtenidos in situ. Los parámetros analizados en el presente trabajo atendiendo a criterios de decaimiento han sido el EDT y el TR. Con respecto a los criterios energéticos y de inteligibilidad, el estudio de las aulas se ha llevado a cabo mediante la utilización de los parámetros $D_{50}$ y STI, respectivamente.

### 3.2 Simulación acústica de las aulas

En una segunda fase, mediante la utilización del programa Autocad se han construido los modelos geométricos en 3D correspondientes a las aulas estudiadas. Dimensiones, formas, materiales y coordenadas de posición tanto de la fuente emisora, como de cada uno de los receptores medidos durante la toma de datos han sido tenidos en cuenta para confeccionar estos modelos. La tabla 2 muestra las principales características geométricas de las 2 aulas estudiadas.

| Parámetro | Unidad | Aula Master ETSIE | Aula 521 ETSA |
|---|---|---|---|
| Anchura | m | 7.65 | 8.80 |
| Longitud | m | 14.95 | 35.75 |
| Altura | m | 2.85 | 4.70 |
| Volumen | m3 | 325.9 | 1478.6 |
| Superficie para el alumnado | m2 | 68 | 196 |

**Tabla 2: Datos geométricos de las aulas estudiadas**

Una vez construidos los modelos, éstos han sido exportados al programa de simulación acústica Odeon 10·1, mediante el cual se ha reproducido el comportamiento del aula, tanto en condiciones de ausencia de alumnado, como en condiciones de ocupación. Con respecto a la simulación del grado de ocupación, siguiendo las pautas seguidas en investigaciones previas[2], se ha optado por modificar los coeficientes de absorción y difusión del área ocupada por el alumnado en función de que el aula se haya simulado en vacío o con presencia de alumnado. La tabla 3 recoge los diferentes coeficientes de absorción utilizados en cada caso.

| Coeficientes Absorc. Área ocupada (Mobiliario+Público) | Coeficientes de Difusión (125Hz–4000Hz) | Frecuencia | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1000Hz | 2000Hz | 4000Hz |
| Aula en vacío | 0.3 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.01 |
| Aula ocupada | 0.5 | 0.15 | 0.24 | 0.42 | 0.67 | 0.82 | 0.88 |

**Tabla 3: Coeficientes de Absorción del área ocupada por el alumnado**

Con respecto a la modelización del área ocupada por el alumnado, si bien encontramos distintos criterios a la hora de introducir ésta en los modelos de simulación,[2,5] en nuestro caso esta superficie se ha simulado mediante la superposición de ésta sobre el área del suelo del aula. En último término, ha sido necesario asignar los coeficientes de absorción y difusión de a cada una de los materiales que conforman la envolvente interior del aula. En el presente trabajo, los coeficientes de absorción asignados a los distintos materiales provienen de la base de datos proporcionada por el programa Odeon, la cual hemos complementado con datos publicados por profesionales de prestigio contrastados como Beranek, Marshall o Arau[1,4,11]

### 3.3 Cálculo y análisis de la variación del FMG

Finalmente, tras analizar los datos procedentes de las mediciones in situ y las simulaciones acústicas, se ha calculado el FMG mediante el cálculo del valor promedio de los 4 parámetros estudiados. Del mismo modo se ha llevado a cabo el cálculo del $*FMG_{vacío}$ calculado a partir de los datos del aula medida en vacío. La comparación de estas series de valores permitirá no solo analizar la variación experimentada por el FMG, sino también encontrar un FMG experimental ($*FMG_{exp}$) calculado a partir de los datos del aula medida en vacío, mediante el cual sea posible evaluar el comportamiento previsto para el aula ocupada por el alumnado.

## 4 RESULTADOS

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos atendiendo a la metodología descrita. Así pues, tal y como muestran los gráficos 1 y 2 tras llevar a cabo las simulaciones se observa el ajuste entre las 2 curvas tonales, de modo que las diferencias del TR entre ambas series de valores (medidos y simulados) son inferiores a un 10% de los valores de la medición “in situ.

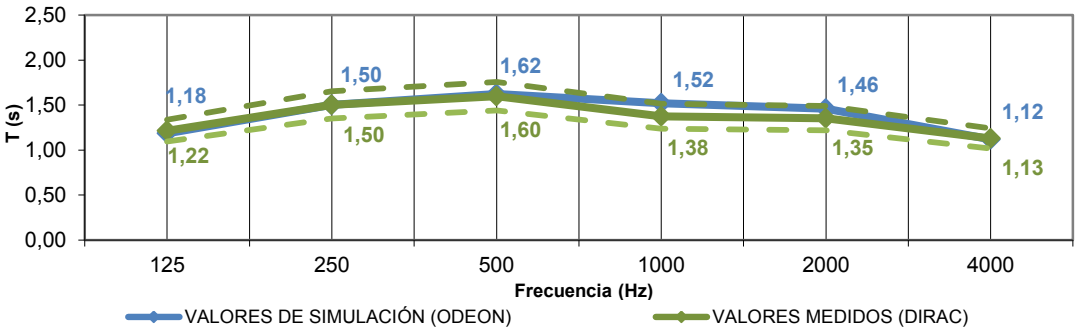



**Gráfico 1: Comparativa de la curva tonal del aula Master de Tecnología (ETSIE)**

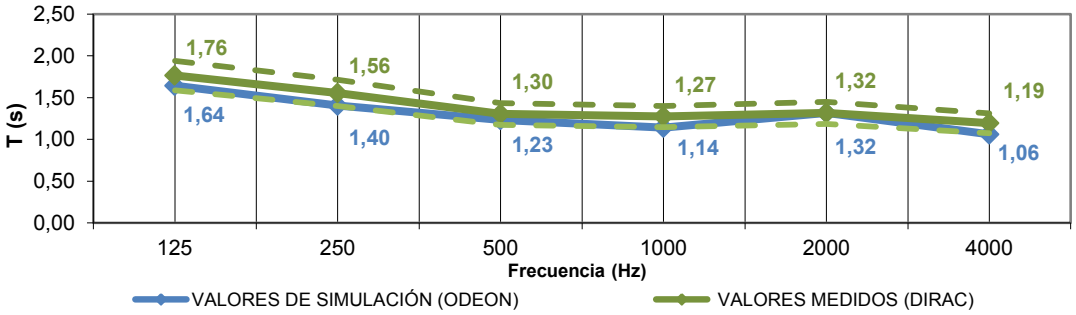



**Gráfico 2: Comparativa de la curva tonal del aula 521 (ETSA)**

Tras ajustar los modelos de modo que la gráfica del TR procedente de la simulación se corresponde con la curva tonal medida en el aula, se decide modificar el material del área de mobiliario, generando de este modo un modelo nuevo de simulación en el cual, a diferencia del anterior, se considera que el mobiliario del aula está ocupado por los alumnos. Los gráficos 3 y 4 muestran las curvas tonales de ambas aulas en condiciones de ocupación.

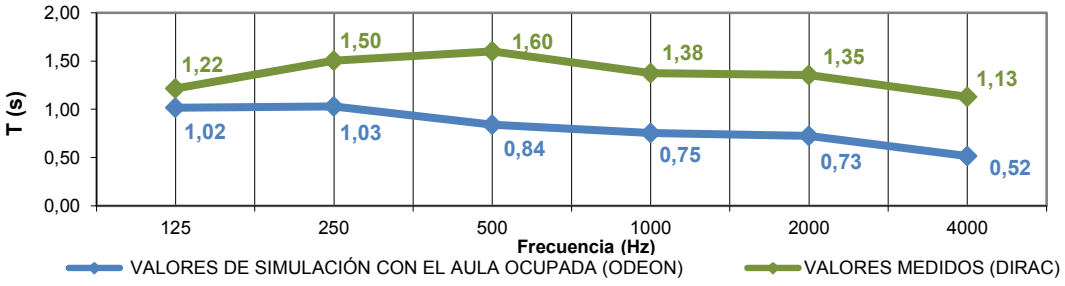



**Gráfico 3: Comparativa del aula Master Tecnología (ETSIE) en condiciones de vacío y de ocupación**

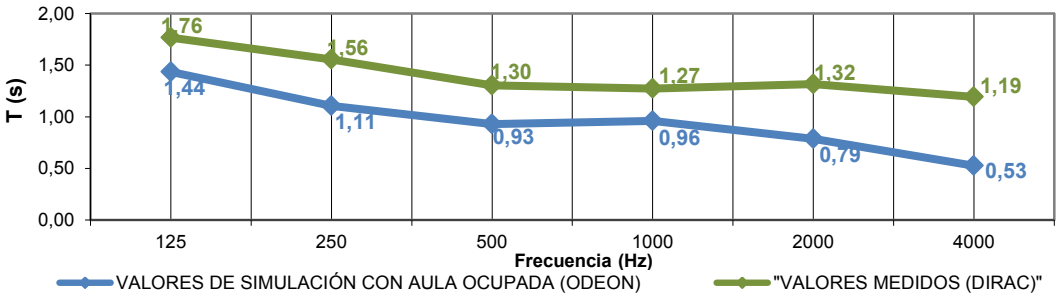



**Gráfico 4: Comparativa del aula 521 (ETSA) en condiciones de vacío y de ocupación**

Tal y como se observa en la tabla 4 tras finalizar el proceso de simulación, los parámetros acústicos derivados de éste son utilizados para el cálculo del FMG de ambos espacios. Del mismo modo, los valores procedentes de la medición de las aulas en vacío son utilizados para calcular el *FMG $_{vacío}$ que correspondería a estas aulas.

| | | EDT | TR | D50 | STI | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aula Máster Tecnología (ETSIE)** | Valores de Simulación Aula ocupada | 0.76 | 0.80 | 0.60 | 0.68 | **FMG** |
| | Factor de Mérito asociado | 0.80 | 0.89 | 0.76 | 0.83 | 0.82 |
| **Aula 521 (ETSA)** | Valores de Simulación Aula ocupada | 0.78 | 0.95 | 0.73 | 0.69 | **FMG** |
| | Factor de Mérito asociado | 0.93 | 0.95 | 1 | 0.87 | 0.94 |

| | | EDT | TR | D50 | STI | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aula Máster Tecnología (ETSIE)** | Valores medios en Aula *en vacío* | 1,47 | 1,48 | 0.38 | 0.55 | ***FMG $_{vacío}$** |
| | Factor de Mérito asociado | *0.76* | *0* | *0* | *0.56* | *0.33* |
| **Aula 521 (ETSA)** | Valores medios Aula *en vacío* | 0.78 | 0.95 | 0.73 | 0.69 | ***FMG $_{vacío}$** |
| | Factor de Mérito asociado | *0.97* | *0.26* | *0.88* | *0.65* | *0.69* |

**Tabla 4: Cálculo del FMG y del *FMG $_{vacío}$ asociado a las aulas estudiadas**

Los gráficos 5 y 6 recogen las variación experimentada por el factor de mérito asociado a los parámetros D50 y STI respectivamente, en condiciones de vacío y ocupación. Atendiendo a los resultados obtenidos tanto en el caso del parámetro $D_{50}$ como en el del STI, los intervalos propuestos por Arau para el cálculo del factor de mérito guardan una relación con los valores obtenidos en las mismas salas en condiciones de vacío.

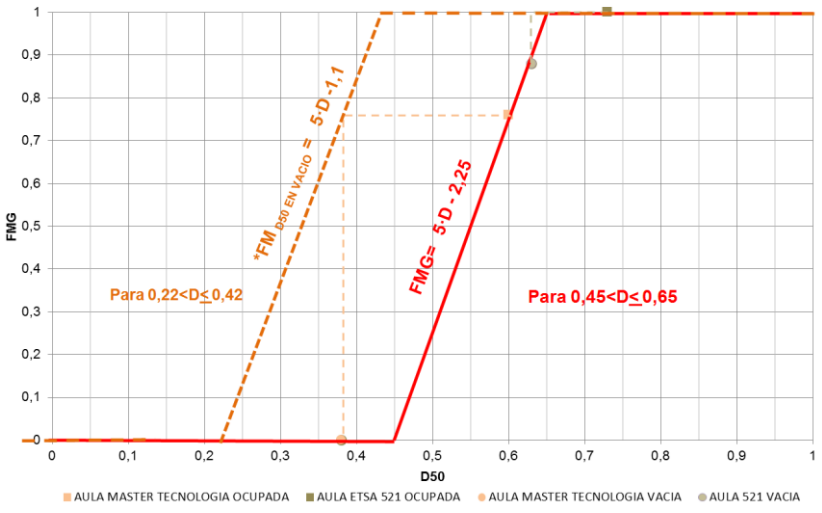



**Gráfico 5: Comparativa del Factor de mérito asociado al parámetro D50 en condiciones de vacío y ocupación.**

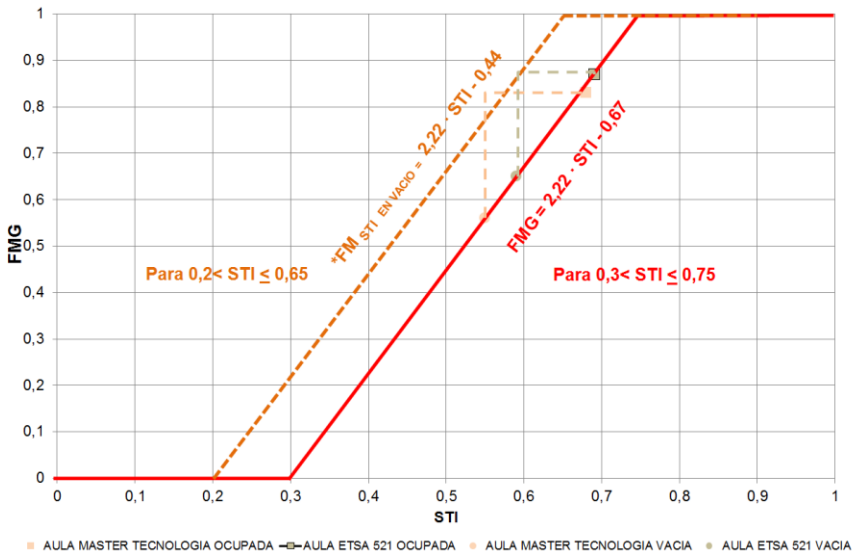



**Gráfico 6: Comparativa del Factor de mérito asociado al parámetro STI en condiciones de vacío y ocupación.**

Del mismo modo, en el caso del factor de mérito asociado al TR del aula, éste puede ser calculado aplicando la Fórmula de la reverberación de Sabine y el incremento de absorción introducido por el alumnado

| | V (m3) | TR mid medido | Absorción (Medida) | Área Alumnado (m2) | Absorción Alumnado (500-1000Hz) | Incremento Absorción Alumnado | TR mid Aula ocupada (SABINE) | TR mid Aula ocupada (ODEON) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Aula ETSIE M. Tecno.** | 349,3 | 1,48 s | 38,47 | 68,40 | 0,55 | 37,28 Sabines | 0,80 s | 0,80 s |
| **Aula ETSA 521** | 1518,2 | 1,29 s | 191,84 | 196,60 | 0,55 | 107,15 Sabines | 0,87 s | 0,95 s |

Finalmente, tras analizar las correlaciones existentes entre el factor de mérito en condiciones de vacío y ocupación, tanto para el TR como para los parámetros D50 y STI, se propone la utilización de los nuevos intervalos (Incluidos en las gráficas 5 y 6) mediante los cuales se calculará el *FMG $_{exp.}$. La tabla 5 muestra el valor de este factor experimental, obtenido para cada parámetro, a partir de los datos medios en sala vacía. Mediante su aplicación y sin necesidad de simular las aulas, es posible correlacionar los valores medidos en sala vacía con los correspondientes valores esperados con el aula ocupada.

| | | | Aula ETSIE M. Tecnología | | | Aula ETSA 521 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *FMG | FMG | Variación | *FMG$_{exp}$ | FMG | Variación |
| **$D_{50}$** | 0 | $D_{50} \leq 0,22$ | 0.80 | 0.76 | 0.04 | 1 | 1 | 0 |
| | 5·D -1,1 | $0,22<D_{50} \leq 0,42$ | | | | | | |
| | 1 | $D_{50} >0,42$ | | | | | | |

| | | | Aula ETSIE M. Tecnología | | | Aula ETSA 521 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *FMG | FMG | Variación | *FMG$_{exp}$ | FMG | Variación |
| **STI** | 0 | STI≤ 0,2 | 0.78 | 0.83 | 0.05 | 0.87 | 0.87 | 0 |
| | 2,22·STI-0,44 | 0,2<STI ≤ 0,65 | | | | | | |
| | 1 | STI >0,65 | | | | | | |

| | Aula ETSIE Master Tecnología | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **TR** | TRmid calculado Aula ocupada | TR mid simulado Aula ocupada | **Variación** | ***FMG$_{exp}$** | **FMG** | **Variación** |
| | 0.80 | 0.80 | 0 | 0.88 | 0.89 | 0.01 |

| | Aula ETSA 521 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **TR** | TRmid calculado Aula ocupada | TR mid simulado Aula ocupada | **Variación** | ***FMG$_{exp}$** | **FMG** | **Variación** |
| | 0.87 | 0.95 | 0.04 | 1 | 0.95 | 0.05 |

**Tabla 5: Comparativa del FMG y del *FMG $_{exp}$ asociado a las aulas estudiadas**

## 5 CONLUSIONES

* El comportamiento acústico de las aulas en vacío, desde el punto de vista de la inteligibilidad de la palabra y de la reverberación está por debajo de los estándares recomendados para aulas docentes, especialmente en el caso del aula Master de Tecnología.

* La presencia de alumnado en las aulas mejora el comportamiento de éstas, aunque su incidencia resulta mayor en el aula de la ETSIE, más reverberante y de pequeño volumen.

* La aplicación del *FMG$_{exp}$ permite relacionar los valores medidos en sala vacía con los valores esperados en sala ocupada sin necesidad de recurrir a las simulaciones acústicas, previendo así el comportamiento acústico para estos espacios en condiciones de ocupación.

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo deben ser ampliadas en futuras líneas de investigación. Así pues, estudiar la aplicabilidad del *FMG$_{exp}$ en un mayor número de aulas, y utilizar distintos grados de ocupación de las aulas resultar una labor de gran interés científico.

## 6 BIBLIOGRAFIA

(1) Arau H. ABC de la Acústica Arquitectónica. CEAC (Barcelona) 1999:268.
(2) Astolfi A, Corrado V, Griginis A. Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms. Appl Acoust 2008;69(11):966-976.
(3) Awad HS, Farag HH, Taha DS, Hanafi MA. Architectural acoustics in educational facilities: An empirical study on university classrooms in Egypt. J Acoust Soc Am 2012 2012-Sep;132(3).
(4) Beranek LL. How they sound concert and opera halls. Acoust.Soc.Am. 1996.
(5) Bradley JS. Computer Studies of Optimum Classroom Acoustics. Can Acoustics 1998;26(3):16-18.
(6) Escobar VG, Morillas JMB. Analysis of Acoustical Characteristics and Some Recommendations for Different Educational Rooms. Archives of Acoustics 2011 2011;36(4).
(7) Hodgson M. Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms. J Acoust Soc Am 1999 OCT 1999;106(4).
(8) Hodgson M, Rempel R, Kennedy S. Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. J Acoust Soc Am 1999 JAN 1999;105(1).
(9) Passero CRM, Zannin PHT. Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas. Appl Acoust 2010;71(12):1204-1210.
(10) Trombetta Zannin PH, Coelho Ferreira AM. Field measurements of acoustic quality in university classrooms. Journal of Scientific & Industrial Research 2009 DEC 2009;68(12).(11)
(11) Sanchis Mullor F; LLopis A; Guillen I; Gomez, V. 45º Congreso Español de Acústica ISBN: 978-84-87985-25-6. ISSN: 2340-7441 (Versión Digital). Murcia. España. Octubre, 2014

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO DE SOLUCIONES DE CONFORT ACÚSTICO PARA EL ESPACIO BAJO VIADUCTO DE LA PLAZA REKALDE DE BILBAO

PACS:43.55.Ka/43.50.Rq

Santander Pantioso, Alvaro[1]; García Pérez, Igone[1]; Aspuru Soloaga, Itziar[1], Herranz Pascual, Karmele[1], Viñez, Fran[2], Bustamante Fernández, María Teresa[2]
1. TECNALIA Research & Innovation. 2. Ayuntamiento de Bilbao
(1) C/ Geldo Edificio 700, Parque Tecnológico de Bizkaia, Derio, Bizkaia, 902 760 000
E-Mail: alvaro.santander@tecnalia.com
(2) Plaza de Ernesto Erkoreka, 1, 48007 Bilbao, 944 20 42 00
E-Mail: teresaf@ayto.bilbao.net

## ABSTRACT

The relationship between quality of life and public space is one of the main features of urban actions carried out by the City Council of Bilbao, integrating the acoustic factor in processes of urban renewal. The work carried out in an area of Bilbao, Rekalde Square, is reflecting this approach. In this project, the morphology of the environment and the presence of a low viaduct result in the need to analyze the nature of the reverberant space for defining the improvement targets. This work is an example of application of simulation models designed for building and refurbishment of rooms, for environmental urban areas of special features that can have numerous applications on city design. The result defines a comprehensive intervention of acoustic solutions, together with other needs of the space, for the final evaluation of its effectiveness, in terms of redesigning public spaces orienting their use to which it is intended: the sports.

## RESUMEN

La relación entre calidad de vida y calidad del espacio público es uno de los ejes motores de las actuaciones urbanas llevadas cabo por el Ayuntamiento de Bilbao en los últimos años. En este marco de trabajo, la integración de la variable acústica en procesos de remodelación urbana donde esta cuestión puede ser un elemento clave, está siendo una constante en Bilbao. Como reflejo de esta aproximación, se presenta el trabajo llevado a cabo en una zona de la Plaza Rekalde de Bilbao en donde la morfología del entorno y la presencia de un viaducto a aja cota con respecto al suelo derivan en la necesidad de analizar la naturaleza reverberante del espacio para la definición de objetivos de mejora. El presente trabajo constituye un ejemplo de aplicación de modelos de simulación pensados para edificación y acondicionamiento de salas para espacios urbanos ambientales de características especiales que puede tener numerosas aplicaciones a nivel de diseño de ciudad. El resultado del trabajo define una propuesta de intervención integral de soluciones acústicas con otras necesidades del espacio para la evaluación final de su eficacia en términos de acondicionamiento del espacio orientado el uso al que está destinado: el deportivo.

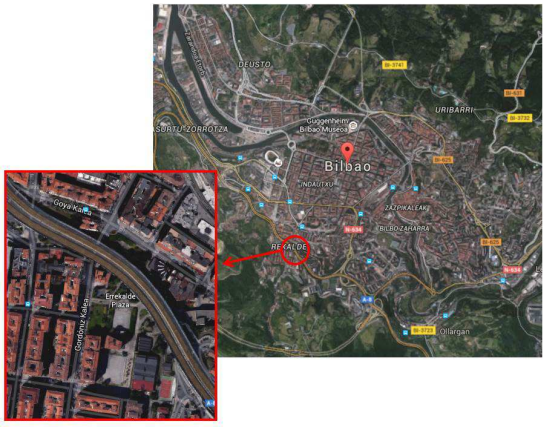
## 1- OBJETO E INTRODUCCIÓN

La preocupación de Ayuntamiento de Bilbao por la calidad del espacio público se ha reflejado con diferentes iniciativas que mejoran la habitabilidad de la ciudad [1]. Dentro de esta búsqueda de la calidad, el confort ambiental se considera una variable a atender y, en concreto, la variable acústica se considera uno de los elementos clave para poner en valor los espacios y fomentar su uso [2].

Bajo este marco de trabajo, el Ayuntamiento de Bilbao desarrolla la Estrategia Islas Sonoras con la finalidad de crear y poner en valor, en diferentes zonas de la ciudad, espacios cuyo paisaje sonoro invite a la relajación. Como reflejo de esta estrategia de trabajo, el Ayuntamiento de Bilbao en el marco del proyecto LIFE+ QUADMAP [3] desarrolló la primera Isla Sonora de la ciudad en la Plaza General Latorre.

Esta experiencia de trabajo tiene vocación de extenderse a otros espacios urbanos del municipio, ajustando, en cada caso, los requisitos de confortabilidad acústica a las tipologías de uso llevadas a cabo en cada ámbito espacial analizado.

Uno de los espacios municipales emblemáticos lo constituye la Plaza Rekalde, que es el espacio de encuentro e interacción social más relevante del Barrio de Rekalde y con el que sus habitantes se encuentran estrechamente identificados. En este sentido, se trata de un espacio de oportunidad en el que las actuaciones de mejora que puedan llevarse a cabo tendrán un efecto de mucha relevancia, atendiendo al alto grado de uso del espacio tanto en número de personas que lo disfrutan como del tiempo de estancia en el mismo.



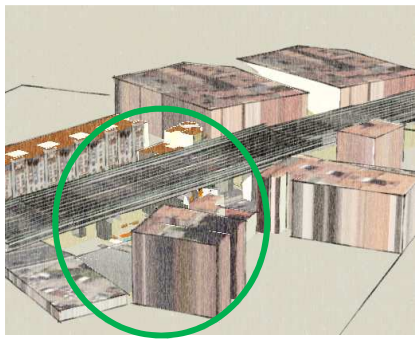

Ubicación de la Plaza Rekalde en el municipio de Bilbao.

El entorno en el que se ubica la Plaza contribuye a crear unas condiciones de disconfort acústico muy destacables, atendiendo no sólo a la presencia de focos de ruido, sino también teniendo en cuenta el carácter reverberante del espacio. La Plaza está completamente rodeada de edificaciones de más de 10 metros de altura y cuenta con un viaducto de competencia supramunicipal que la atraviesa. En conjunto, genera unas condiciones de reverberación que es aún más destacable en uno de los ámbitos concretos de la Plaza en donde la altura del viaducto con respecto a la cota de suelo es de 12 metros.



La presencia del viaducto en la plaza es muy destacable como elemento que condiciona su diseño y afecta a sus condiciones ambientales.





En las imágenes queda indicado el ámbito de estudio de confortabilidad acústica en la Plaza Rekalde. Se observa que el ámbito con influencia del viaducto, y cuyo análisis es objeto de presentación en el presente artículo, está marcado con un círculo.

El objetivo del Ayuntamiento de Bilbao, en este ámbito concreto, se centra en la mejora de las condiciones acústicas del espacio asociadas a la reverberación para la adecuación óptima del espacio, pensando en el mantenimiento de actual uso: el deportivo. Dentro del alcance del estudio se encuentra la posible reorganización de los espacios deportivos, pues ello puede derivar en un mejor condicionamiento acústico para los mismos.

## 2- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El objetivo del presente apartado es especificar la metodología de evaluación seleccionada para valorar el confort acústico en la zona objeto de análisis.

A tal efecto se desarrollaron unas evaluaciones preliminares basadas en mediciones acústicas que permitieron concluir dos puntos de relevancia:

1- La influencia de los focos de ruido que rodean el entorno es destacable (especialmente por los viales urbanos y, más aún, por el sonido de las juntas de dilatación del viaducto).
2- La capacidad reverberante de la ubicación (por la morfología del ámbito y por la influencia del viaducto) amplifica los sonidos que se producen en la zona como consecuencia de las actividades que en ella se llevan a cabo, así como las correspondientes a las juntas de dilatación citadas.





Fotografías que ilustra parte de las actividades deportivas desarrolladas bajo el viaducto, dentro de la zona objeto de análisis En la zona más cercana al resto de la plaza, dentro del ámbito de análisis, destaca la presencia de un frontón (infrautilizado) cuya morfología contribuye a la creación de un espacio reverberante.

Una vez analizados los datos de la evaluaciones preliminares se llega a la conclusión de que los índices acústicos que más pueden influir en el confort ambiental del espacio (además del SPL, la composición de la atmósfera sonora y la presencia de eventos) son los que definen las acústica arquitectónica del recito. Para su análisis es necesario aplicar metodologías de simulación acústica para recintos cerrados con una aproximación que permita que los resultados de los análisis sean asimilables a la realidad acústica y sea posible definir y evaluar la eficacia de actuaciones para la mejora del confort.

## 2.1. Índices Acústicos objeto de Análisis

Los índices acústicos a utilizar para caracterizar el viaducto y poder disponer de un modelo de simulación del mismo que facilite la evaluación de alternativas y escenarios, son los siguientes:

El *tiempo de reverberación (Tr)* es el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en alcanzar una caída de 60 dB respecto del nivel inicial, una vez apagada la fuente sonora. Depende del volumen del local y de los materiales superficiales interiores de paredes, techo y suelo. El tiempo de reverberación aumenta con el tamaño del local, y puede producir sonidos de difícil comprensión, ininteligibles. La norma de medida utilizada para la medición del tiempo de reverberación es UNE-EN-ISO 3382 [4].

El *nivel de presión sonora (SPL).* Además de las mediciones de tiempo de reverberación, es necesario evaluar la presión sonora a lo largo de todos los espacios deportivos bajo el viaducto para caracterizar la distribución de presión sonora en cada zona de uso.

Estos índices permiten la caracterización acústica del viaducto, pero sin una modelización del mismo no es posible evaluar escenarios antes de que estos se produzcan o definir actuaciones de mejora y estudiar sus consecuencias.

Para la evaluación de estos índices se siguen dos metodologías complementarias:

- Modelización: cuyo alcance se va a describir en el siguiente apartado (2.2), y
- Medición: que tiene como objetivo principal permitir verificar el modelo utilizado y ajustar los parámetros de la modelización que se consideren oportunos, especialmente los materiales, para que sea lo más representativa posible a la realidad del emplazamiento.

*Descripción de la campaña de mediciones*:

Para la elaboración de las campañas de mediciones, el ámbito objeto de análisis se divide el espacio evaluado en tres zonas debido a las diferentes características que estos tres emplazamientos presentan desde el punto de vista morfológico y de materiales. Las zonas son: frontón, cancha de futbito y cancha de baloncesto. La fecha de realización de las mediciones fue el día 18 de Abril de 2015.

El horario seleccionado para las mediciones debía ajustarse al objetivo perseguido de caracterización acústica de la arquitectónica del emplazamiento, para lo cual no debía haber actividad en la zona objeto de análisis y en el ámbito colindante al mismo (fundamentalmente ruido de tráfico urbano). Esto implicó la realización de las mediciones en período nocturno (entre las 12 y las 3 am). Se trataba de reducir el ruido de fondo al máximo, especialmente para la medición del tiempo de reverberación, ya que lograr una caída de 20 dBA en un entorno urbano resulta complejo. El ruido de fondo durante el periodo diurno es superior a 60 dBA, que baja hasta 55 dBA durante las primeras horas de la noche.

Tal y como se ha comentado, todas las mediciones se efectuaron sin presencia de público. En cada una de las zonas evaluadas se seleccionaron 3 posiciones de fuente, debido a las dimensiones de los espacios, y 3 posiciones de micrófono, efectuándose dos medidas en cada posición y obteniéndose 16 posiciones de combinaciones fuente-micrófono para cada una de las tres zonas evaluadas.

El tiempo de reverberación varía en las distintas posiciones elegidas en la zona de estudio, por lo que se efectúan mediciones en varios puntos y se hace un promedio de los espectros de TR.

## 2.2. Modelización del ámbito de estudio

El objetivo de esta tarea es efectuar una modelización tridimensional de la zona de estudio en un software acústico que permita caracterizar los índices comentados en el apartado anterior para evaluar escenarios y analizar las consecuencias acústicas de determinadas intervenciones o actuaciones.

Para ello, el modelo seleccionado es ODEON Room Acoustics Software. Una de las labores que implican mayor consumo de recursos en la modelización corresponde a la definición tridimensional de los diferentes paramentos, así como la asignación de propiedades acústicas a los mismos.

Con el fin de agilizar la primera de las tareas, la definición tridimensional de los paramentos y elementos de recinto, se utiliza un software comercial: SketchUp, que es un programa informático de diseño y modelaje en 3D para entornos arquitectónicos, ingeniería civil, etc. Esta herramienta permite conceptualizar rápidamente volúmenes y formas arquitectónicas de un espacio.

La modelización tridimensional efectuada en este software se puede importar de forma tridimensional al software ODEON para el desarrollo del trazado de rayos.

El desarrollo de la modelización en SketchUp requiere efectuar un trabajo de campo muy específico para obtener distancias y condicionantes geométricos y morfológicos de la zona. Se ha modelizado con detalle todos los elementos singulares que tienen influencia acústica en la zona.

A continuación se muestran algunas imágenes de la zona y la modelización 3D asociada:






Además de agilizar el proceso de modelización en ODEON, una de las ventajas añadidas en la utilización de SketchUp como base para la modelización acústica es que se trata de un software que suele ser utilizado por los arquitectos para la realización de sus diseños e infografías. Esto permite disponer de un formato de intercambio durante procesos de diseño de nuevos espacios o remodelación de los existentes.

Tal y como se ha comentado anteriormente, este modelo fue validado a través de la realización de una exhaustiva campaña de mediciones que se ha presentado en el apartado anterior y que permitió una mejor caracterización de la tipología de materiales en el entorno de análisis.

Una vez validado, la diferencia máxima en el tiempo de reverberación es de 0,3 segundos como máximo (para tiempos de reverberación que se sitúan cercanos a los 2,2 segundos) mientras que la diferencia máxima en nivel de presión sonora es de 2,5 dBA (para niveles de presión sonora que, durante la actividad, se puede situar en los 70 dBA en los momentos de alta intensidad del uso del espacio objeto de estudio).

## 3- RESULTADOS

Tal y como ya se ha comentado, la finalidad del análisis era proponer actuaciones de mejora para el acondicionamiento acústico del emplazamiento con el objetivo de hacer más confortable acústicamente el uso deportivo que se sitúa bajo el viaducto.

A tal efecto, las evaluaciones y modelizaciones efectuadas se diferencian en dos fases:

- Modelizaciones para el análisis del margen de mejora posible con actuaciones tipo.
- Modelizaciones de actuaciones de mejora que implican el rediseño del espacio.

Las segundas modelizaciones se alimentan de las conclusiones extraídas de las primeras, trasladando a la realidad del emplazamiento aquellas actuaciones que se hayan observado que permiten un mayor margen de mejora.

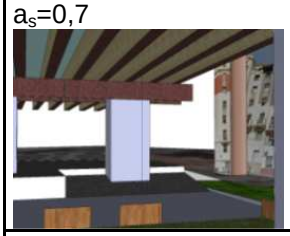
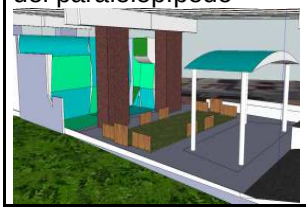
*Resultados de las Modelizaciones para el análisis del margen de mejora en Actuaciones Tipo*

Las actuaciones tipo evaluadas fueron las siguientes:

a) Tratamiento del Suelo con material absorbente: esta actuación presenta mejoras relativamente bajas (0,3 y 0,7 segundos en función del coeficiente de absorción) y tiene el inconveniente añadido de poder interferir en la ejecución de las actividades deportivas.
b) Tratamiento de los Pilares del Viaducto con material absorbente: la superficie a tratar es amplia y el coste/beneficio es muy bajo.
c) Tratamiento del Techo del Viaducto con material absorbente: en este caso el beneficio es alto en términos acústicos (entre 0,7 y 1,2 segundos en función del coeficiente de absorción). Tiene como inconveniente el alto coste y el hecho de que el Viaducto, al no ser de gestión municipal, requiera un proceso de coordinación institucional para llevar a cabo la actuación.
d) Rotura de la Morfología del paralelepípedo: cubierta bajo techo de Viaducto para el acondicionamiento acústico y rediseño del Frontón interior. Esta actuación tiene ventajas añadidas a la acústica que tiene que ver con que el Viaducto es un elemento que no sufre modificaciones y combina el tratamiento del techo (con la creación de una cubierta) y del paramento de la zona con mayor tiempo de reverberación: el frontón.

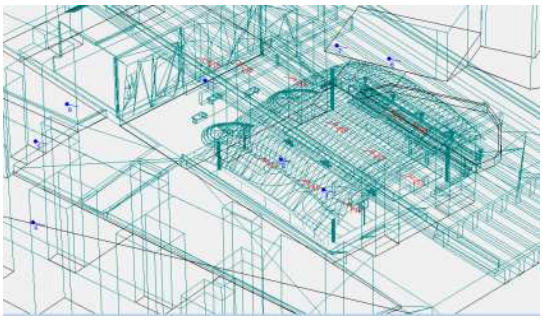
A continuación, se comparan los resultados de las actuaciones que tienen mayor eficacia acústica, analizando no solo los tiempos de reverberación sino también los niveles de presión sonora.

| | Tiempo de Reverberación T20 ( segundos) | | | | Niveles de Presión Sonora (dBA) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Situación de Partida | | Frontón | Fulbito | Baloncesto | | Frontón | Futbito | Baloncesto |
| | TR20 (seg) | 2,2 | 2,1 | 2,1 | dB(A) | 65,9 | 65,4 | 64 |
| Tratamiento del Techo $a_s$=0,3 | | Frontón | Fulbito | Baloncesto | | Frontón | Futbito | Baloncesto |
| | TR20 (seg) | 1,6 | 1,7 | 1,7 | dB(A) | 64,5 | 64,5 | 62,3 |
|  | Dif. con situación de partida | -0,6 | -0,4 | -0,4 | Dif. con situación de partida | -1,4 | -0,9 | -1,7 |

| | | Tiempo de Reverberación T20 ( segundos) | | | | Niveles de Presión Sonora (dBA) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratamiento del Techo $a_s$=0,7  | | Frontón | Fulbito | Baloncesto | | Frontón | Futbito | Baloncesto |
| | TR20 (seg) | 1,4 | 1,4 | 1,6 | dB(A) | 63,7 | 64 | 61,4 |
| | Dif. con situación de partida | -0,8 | -0,7 | -0,5 | Dif. con situación de partida | -2,2 | -1,4 | -2,6 |
| Rotura de la Morfología del paralelepípedo  | | Frontón | Fulbito | Baloncesto | | Frontón | Futbito | Baloncesto |
| | TR20 (seg) | 1,8 | 1,8 | 1,8 | dB(A) | 62,1 | 64,5 | 61,7 |
| | Dif. con situación de partida | -0,4 | -0,3 | -0,3 | Dif. con situación de partida | -3,8 | -0,9 | -2,3 |

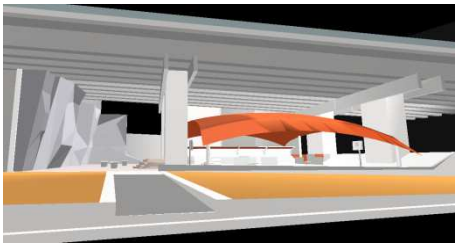
Tras el análisis de los resultados, analizados conjuntamente por parte del Ayuntamiento de Bilbao y de Tecnalia, el Consistorio decide que la opción más óptima para realizar un análisis de propuesta es el rediseño completo del uso deportivo, modificando la ubicación y orientación de las canchas y cambiando el uso del frontón atendiendo a su bajo grado de utilización y a la existencia de otro frontón muy cercano.

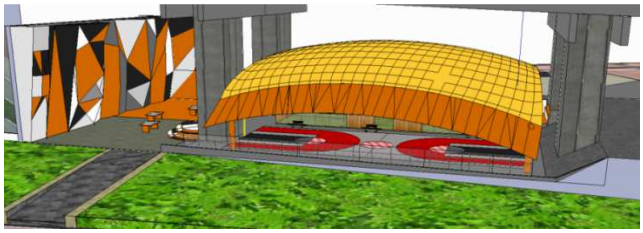
La propuesta de diseño desarrollada por Tecnalia con los criterios del Ayuntamiento de Bilbao se muestra a continuación (aún sin la valoración, ni aprobación definitiva de ejecución por parte del Ayuntamiento de Bilbao):





Propuesta de reordenación de las canchas de baloncesto, del campo de futbito (con suelo absorbente) y de las mesas de ping-pong para una mejor organización del espacio. Desarrollo de gradas que aporten material absorbente y permitan de eventos deportivos.





El frontón se convierte en un rocódromo, lo que permite romper la morfología del espacio y aumentar la superficie de material absorbente. Así mismo se sube la cota del frontón a la del resto del espacio y se crea un acceso a la zona derribando una pared del frontón para reducir el carácter reverberante. Se desarrolla una cubierta absorbente que permite protegerse más eficazmente de la lluvia (con respecto a la protección que ofrece el viaducto), reducir el ruido de las juntas de dilatación en la zona deportiva y disminuir la reverberación.

Esta propuesta de diseño permite las siguientes mejoras con respecto a la situación de partida:

| | Frontón | Futbito | Baloncesto |
|---|---|---|---|
| Diferencias en TR 20 con respecto a la situación de partida | -0,6 seg | -0,7 seg | -0,7 seg |
| Diferencias en SPL con respecto a la situación de partida | -3 dBA | -2,6 dBA | -3,9 dBA |

Como se observa, el beneficio en términos de confort acústico es muy destacable con el diseño propuesto.

## 4- CONCLUSIONES Y APLICACIONES

El presente artículo pone de manifiesto cómo se pueden aplicar modelos de simulación pensados para edificación y acondicionamiento de salas para espacios urbanos ambientales de características especiales.

Esta aplicación resulta de mucha utilidad para poder diseñar o remodelar espacios urbanos en los que el carácter reverberante constituye un factor limitante en la utilización del espacio. En el caso del estudio presentado, el objetivo era buscar una adecuación acústica para reducir el carácter reverberante del espacio evitando la amplificación acústica de los sonidos generados por la actividad deportiva que se da bajo el viaducto. Por todo ello, este tipo de herramientas puede tener aplicaciones que ayuden al acondicionamiento acústico de espacios urbanos creando auditorios urbanos en donde se potencien y pongan en valor los sonidos que se desee amplificar (por ejemplo el de una fuente de agua u otros sonidos naturales, así como actuaciones de música callejera o actividades de lectura en grupo).

## AGRADECIMIENTOS

Muy especialmente al Ayuntamiento de Bilbao por financiar un proyecto diferente y por su capacidad tractora en el diseño de espacios de calidad que mejoran notablemente el nivel de convivencia urbana.

## REFERENCIAS

[1] I. Aspuru Soloaga. Soundscape within the strategy of Bilbao city to improve quality of public spaces. *Proceedings of the AIA-DAGA 2013 Joint Conference on Acoustics*, Merano, Italy, 2013.

[2] I. García (2014), Regeneración urbana-más allá de la edificación. Artículo en la Revista Ciudad Sostenible 3 trimestre de 2014

[3] http://www.quadmap.eu/

[4] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ACÚSTICA DE LA CAPILLA DE SAN FRANCISCO DE ASÍS EN AZCAPOTZALCO, MÉXICO: ESTUDIO DEL IMPACTO QUE CAUSARON LAS INTERVENCIONES ARQUITECTÓNICAS

PACS 43.55.Ka

Rodríguez Manzo Fausto E.; Lancón Rivera Laura A.; Garay Vargas Elisa, García Martínez Silvia G; Ponce Patrón Dulce R.
Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Departamento de Procesos y Técnicas. Av. San Pablo 180 Edificio S, 1º piso, Col. Reynosa Tamaulipas, CP 02200, Azcapotzalco, México, Distrito Federal. Teléfono (52) (55) 5318 9000 ext. 2236, ladac@correo.azc.uam.mx

## ABSTRACT

The Chapel of San Francisco was the first church built in the sixteenth century in Azcapotzalco, once a mighty prehispanic state in ancient times and whose spiritual conquest was in charge of the Dominican order. The temple was built in the Mudejar style and has changed to the extent that today the deck and beams are made of concrete. This paper presents a comparative analysis of the acoustic response of the chapel in its current state with respect to its original state by using the CATT acoustic simulation program.

## RESUMEN

La Capilla de San Francisco fue el primer templo construido en el siglo XVI en Azcapotzalco, que fuera un pueblo poderoso en la época prehispánica y cuya conquista espiritual estuviera a cargo de la orden de los dominicos. El templo fue erigido en un estilo mudéjar y ha sufrido cambios; al grado que hoy la cubierta y las vigas son de hormigón. Este trabajo muestra un análisis comparativo de la respuesta acústica de la capilla en su estado actual con respecto a su estado original, mediante el uso del programa de simulación acústica CATT.

## ANTECEDENTES

Azcapotzalco, palabra que significa "lugar del hormiguero", fue una región dominada por los tepanecas, uno de los grupos étnicos que poblaron la Cuenca del Valle de México, tras la caída de una de las mayores ciudades prehispánicas de Mesoamérica, Teotihuacán. Azcapotzalco, desde su fundación (entre los siglos XII y XIII), fue considerado un pueblo muy importante desde el punto de vista económico y comercial, conformándose así como una región poderosa [1].

Tras la conquista por los españoles iniciada en 1519, varios pueblos como Azcapotzalco decayeron y con el paso del tiempo fueron evangelizados. Específicamente en la región de

Azcapotzalco, entre los años 1528 y 1529, llega la orden de los dominicos con la intención de detener el maltrato que los conquistadores daban a los tepanecas, haciendo que éstos se comprometieran a edificar su convento y parroquia en retribución a tal acto [2].

El conjunto dominico de Azcapotzalco, como otros más, fue erigido sobre los *teocallis* [1] sagrados de los tepanecas, situados al oriente de lo que hoy se conoce como el Jardín Hidalgo, lo que fuera el viejo centro del pueblo de Azcapotzalco [3]. El conjunto cuenta actualmente con un gran atrio arbolado (con sus capillas posas), desde el cual se puede acceder al claustro y a la Parroquia de los Santos Apóstoles Felipe y Santiago. Al interior se ubican dos capillas: la Capilla de Nuestra Señora del Rosario y la Capilla de San Francisco de Asís; de las cuales, a la primera se puede acceder desde la parroquia a través de una puerta adosada al lado norte y la segunda, ubicada del lado sur, a la cual se ingresa después de pasar por la antesacristía.

## LA CAPILLA DE SAN FRANSICO DE ASÍS

La capilla de San Francisco de Asís, de la Tercera Orden, es considerada la primera edificación construida por los dominicos en Azcapotzalco. Debido a la forma de la planta y a la ubicación que ocupa en relación a todo el conjunto arquitectónico conventual (la parroquia, el claustro y el atrio), puede suponerse que es una construcción del siglo XVI [3]. La planta de la capilla es de una sola nave, sin crucero, donde un arco triunfal separa el presbiterio de la nave. El presbiterio remata con un ábside de forma semi-hexagonal, el cual alberga un ciprés estilo neoclásico con diferentes esculturas religiosas. Se cuenta con un coro fabricado de madera con ménsulas que sostienen la viguería, ubicado por encima del acceso al templo. A los costados de los muros se encuentran pinturas, esculturas y urnas religiosas (Fig. 1).



Figura 1. Vistas interiores de la Capilla de San Francisco de Asís; hacia el altar (izquierda) y hacia el coro (derecha)

Por otra parte, según algunas referencias [3,4], la capilla tuvo una techumbre de viguería de madera estilo mudéjar, la cual es típica de la arquitectura realizada en el siglo XVI, que fue modificada hace unas décadas (aunque algunos señalan que fue desde mediados del siglo XIX, [5]) por una techumbre de concreto (hormigón). Actualmente parte del artesonado, que pudo haber sido similar al de la capilla, se conserva en el claustro, al poniente de la misma (Fig. 2).

[1] Se conoce por *teocalli* a los templos que construían los pueblos mesoamericanos, casi siempre de forma piramidal. Estos templos se edificaban para consagrar a alguna deidad, convirtiéndose en lugares venerables para el pueblo.



Figura 2. Conservación del artesonado estilo mudéjar en el claustro del conjunto conventual.

Adicional al cambio en la techumbre, que fue la intervención más importante, la capilla también ha tenido importantes intervenciones arquitectónicas, como la adición de molduras en las pilastras y elementos como pinturas, urnas, esculturas y el ciprés estilo neoclásico, todas ellas realizadas y agregadas entre los siglos XVIII y XIX [3,6].

Actualmente los materiales con los que está construida la capilla son piedra en muros y cantera en columnas, concreto en techo y vigas, y madera en el coro. Y sólo se ocupa para conmemorar los sacramentos del bautismo y la confirmación.

Al ser un recinto de gran valor arquitectónico e histórico, uno de los objetivos de esta investigación, además de evaluar los cambios en el ambiente sonoro que ha tenido a lo largo de los años, es la creación en el tiempo de una memoria sonora que sirva como base de análisis y consulta para futuras intervenciones.

## METODOLOGÍA

Para este estudio se realizaron mediciones en campo, se generó un modelo tridimensional (3D) del espacio en su estado actual que sirvió como base para construir, validar y ajustar el modelo de simulación acústica, con el cual se generaron variantes de dos periodos previos significativos del espacio, para su comparación.

### Medición en campo

Las mediciones acústicas se realizaron durante el día, con el espacio desocupado, de acuerdo al procedimiento establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-2 [7] de respuesta al impulso del espacio. La fuente sonora se ubicó donde habitualmente el párroco realiza la liturgia (en el altar) (Fig. 3). La ubicación de los receptores se distribuyó en el área de audiencia. Para la generación, recepción y procesamiento de la señal se empleó un analizador Norsonic (Nor140), una fuente semidodecaédrica (Nor275) y un micrófono de 1/2" omnidireccional. Tanto la fuente sonora como el micrófono se ubicaron a una altura de 1.20 metros del nivel del piso.

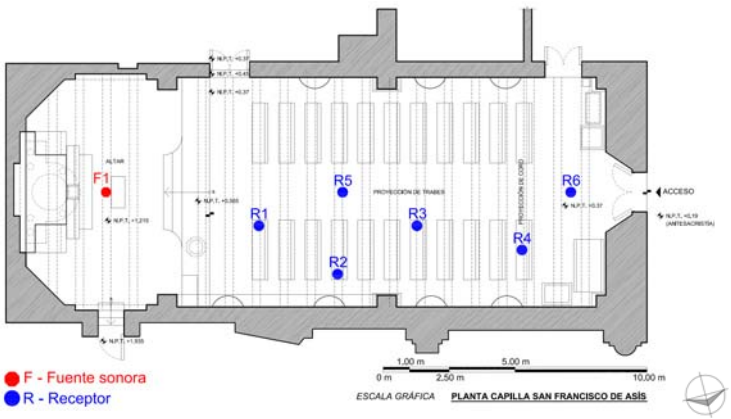



Figura 3. Planta arquitectónica de la Capilla de San Francisco de Asís que muestra las ubicaciones de la fuente sonora y los receptores durante las mediciones.

**Simulación acústica**

Para realizar la simulación acústica se generó un modelo 3D de la capilla que se utilizó en el software CATT-Acoustic v9.0, TUCT (1 800 planos y un volumen de 1 437 $m^3$) en su estado actual. El modelo acústico se ajustó en concordancia con las mediciones del tiempo de reverberación realizadas en campo para su validación (Tabla. 1), así como a partir del cálculo de otros parámetros de calidad acústica que se obtuvieron de la respuesta al impulso del espacio.

| TR (Tiempo de reverberación) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Frecuencia (Hz) | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Medido (s) | 5.55 | 5.16 | 5.33 | 4.44 | 3.78 | 2.58 |
| Simulado (s) | 5.79 | 5.29 | 5.23 | 4.48 | 3.74 | 2.62 |
| JND (%) | 4.23 | 2.47 | 2.02 | 0.94 | 0.93 | 1.32 |

Tabla 1. Valores del TR medidos en campo y simulados con sus JND correspondientes.

Las diferencias encontradas (JND) del tiempo de reverberación entre las mediciones en campo y el modelo simulado no superaron 1 JND (equivalente al 5% para este parámetro [8]). Por lo que se determina que el modelo es fiable en la reproducción de las cualidades acústicas del espacio.

Los coeficientes de absorción y difusión de los materiales con los que se modeló el templo, se ajustaron a partir de fuentes bibliográficas [9,10], con otros materiales semejantes al del estilo arquitectónico del espacio, además de considerar elementos como sillería (madera) y urnas (madera y vidrio), entre otras.

Una vez ajustado el modelo de simulación acústica, se realizó el análisis comparativo del estado actual con dos estados representativos previos del espacio, que corresponden a:

a) el estado original, es decir antes de las intervenciones que se realizaron a partir del siglo XVIII donde los muros, columnas y arcos se encontraban libres de cualquier decoración y el techo original era de estilo mudéjar; y

b) el estado que tuvo entre los siglos XVIII y XIX, en el que se realizaron la mayor parte de las intervenciones arquitectónicas, como fueron la adición de molduras en las pilastras, pinturas, urnas, esculturas y el ciprés estilo neoclásico, conservando únicamente el techo original en estilo mudéjar (Fig. 4).

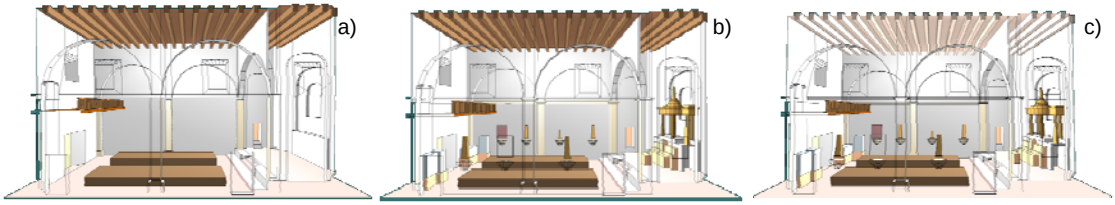



Figura 4. Modelos en 3D de la capilla para las simulaciones acústicas: a) en su estado original; b) tras las intervenciones arquitectónicas entre los siglos XVIII y XIX; y c) en su estado actual.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el procedimiento de simulación acústica se obtuvieron los parámetros de interés y se compararon gráficamente con las mediciones realizadas en campo. En la Figura 5 se observa un comportamiento espectral similar en cada uno de los parámetros, pero con aumento o disminución de los valores según el caso.

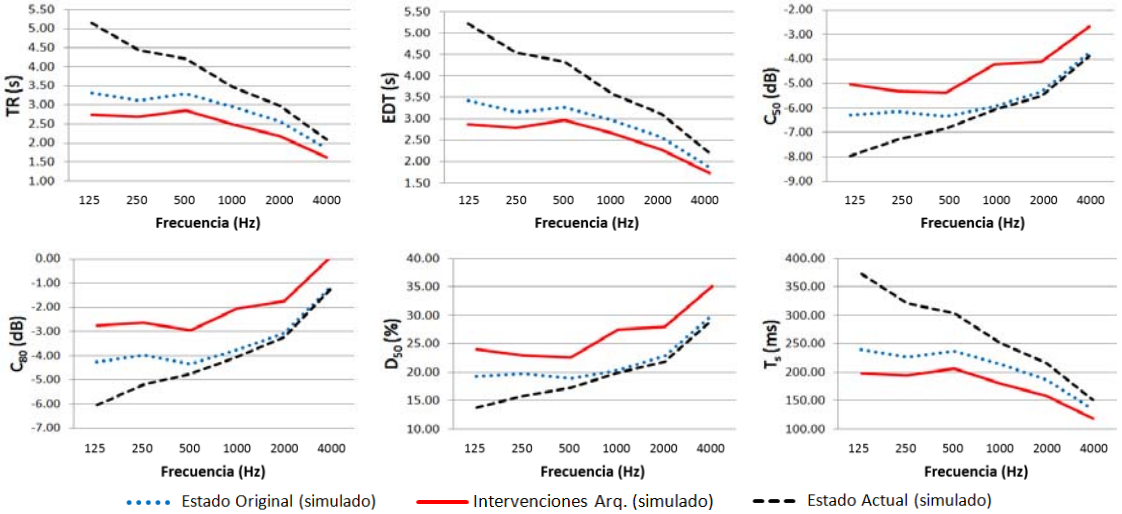



Figura 5. Valores de los distintos parámetros acústicos simulados con audiencia.

Si se analiza la Figura 5, en referencia a dichos parámetros y a sus valores sugeridos según el volumen del espacio [7,11,12,13,14], se puede decir que en relación a:

- El tiempo de reverberación (TR) y el decaimiento inicial (EDT), los valores sugeridos para espacios religiosos oscilan de los 1.3 s hasta los 1.8 s. Los valores de los tres estados del espacio se ubican por encima del máximo sugerido, lo que significa que el espacio siempre ha sido muy reverberante o vivo, como es de esperarse de cualquier espacio con estas características, pues se entiende que un templo religioso católico es reverberante. Sin embargo, el estado más reverberante es el actual y el menos el de las intervenciones que tuvo entre los siglos XVIII y XIX.

- Para claridad de la palabra ($C_{50}$), se sugieren valores por arriba de 2 dB, valor que no se cumple debido a la reverberación en los tres estados del espacio. Estos valores indican que el mensaje oral es demasiado confuso o pobre, por lo que el espacio no es adecuado para el habla.

- Para claridad musical ($C_{80}$) se recomiendan valores entre -4 dB a 4 dB. Este rango está muy cercano al estado original del espacio y al de las intervenciones realizadas entre los siglos XVIII y XIX, dando la sensación de un sonido claro. El rango se aleja en el espacio en su estado actual.

- En cuanto a la definición ($D_{50}$), entre mayor sea el valor, más elevada será la definición sonora. Para espacios adecuados para la palabra, los valores deben ser superiores al 65%, mientras que para espacios donde se combinan la música y la palabra, se recomiendan valores entre 50% a 65%. Los tres estados presentan valores entre 15% a 25%, esto hace que el espacio se sienta poco íntimo, lo que está ligado a espacios con exceso de tiempo de reverberación o demasiado vivos.

- Finalmente, para el tiempo central ($T_s$) se sugieren valores entre 60 ms y los 260 ms. Entre mayor sea el valor de Ts, se percibirá menor nitidez del sonido, afectando en primer lugar la claridad del habla y en segundo lugar a la claridad musical. Los valores son superiores en el estado actual, por lo que el estado original y el estado de las intervenciones pueden considerarse nítidos para la música más no para la palabra

Si se hace la comparación con referencia a los JND entre el estado actual y el estado con la mayor parte de las intervenciones arquitectónicas (siglos XVIII y XIX), se observa que en la mayoría de los parámetros (a excepción de $C_{50}$ y $C_{80}$) se supera por mucho 1 JND (casi hasta

18 JND), lo que supone que la percepción subjetiva de dichos parámetros es verdaderamente notable (Fig. 6).

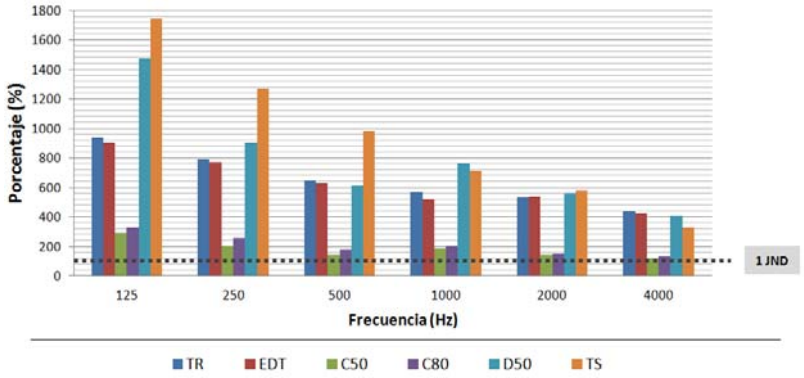



Figura 6. Porcentaje de JND de los distintos parámetros simulados del recinto entre su estado actual y tras las intervenciones arquitectónicas entre los siglos XVIII y XIX.

Por otra parte, en referencia a los JND, entre el estado de las intervenciones arquitectónicas (siglos XVIII y XIX) y su estado original, la mayor parte de los parámetros (a excepción de $C_{50}$ y $C_{80}$) superan 1 JND (hasta 5 JND), lo cual no es tan notable como en el caso anterior (Fig. 7).

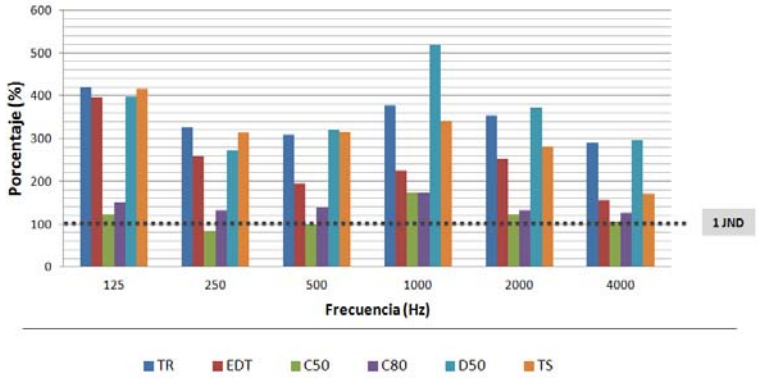



Figura 7. Porcentaje de JND de los distintos parámetros simulados del recinto entre su estado tras las intervenciones arquitectónicas entre los siglos XVIII y XIX; y su estado original.

## CONCLUSIONES

El análisis realizado anteriormente hace evidente la viveza del espacio, sin embargo, se observa que como mejor se comportaba el espacio para una situación musical, fue en el segundo periodo cuando se realizaron las primeras intervenciones (siglos XVIII y XIX), sin embargo no se conoce si este espacio era utilizado musicalmente. Lo anterior puede deberse a que los elementos añadidos, dotaron al espacio de mayor difusión del sonido.

La situación decayó, tanto para la palabra como para la música, con la modificación del techo original (mudéjar a concreto), ocasionando un cambio significativo en la mayor parte de los parámetros por ser un material altamente reflejante.

A partir de la reproducción de tres estados arquitectónicos representativos se hace evidente la importancia de preservar elementos arquitectónicos valiosos, como el techo estilo mudéjar, o uno similar, ya que el original no es posible recuperarlo, que permitan conservar el carácter sonoro del espacio.

Esta investigación es parte de un proyecto que contempla la generación de un catálogo de iglesias en la Delegación Azcapotzalco en la ciudad de México, consideradas patrimonio por su valor arquitectónico e histórico.

**REFERENCIAS**

[1] Artes de México. Revista-Libro Bimestral. Número 101 (Azcapotzalco). 8-19, Diciembre (2010).
[2] Azcapotzalco en el tiempo. Compañía Editorial Impresora y Distribuidora S.A. México, 1974.
[3] Manrique, Jorge, A. Los Dominicos y Azcapotzalco. Cuadernos de la facultad de filosofía, letras y ciencias, Universidad Veracruzana. México, 1963.
[4] Granillo, Lilia. "Presencia morisca en la Parroquia de Azcapotzalco: el artesonado mudéjar de los dominicos", en Azcapotzalco, una historia y sus conflictos. Volumen III, Números 6/7, revista cuatrimestral de Ciencias Sociales y Humanidades, UAM Azcapotzalco. 43-55 (1982).
[5] Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Muebles, Azcapotzalco. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. (Actualización al 2015).
[6] Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles, Azcapotzalco. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, 1988.
[7] UNE-EN ISO 3382-2: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2008.
[8] Martellotta, F. "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces". Acoustical Society of America. 654-663 (2010).
[9] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón. "Acoustic simulation of Mudejar-Gothic churches". Acoustical Society of America. 1207-1218 (2009).
[10] T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón. "Simulación acústica y virtualización en recintos de culto". International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia, España. 38-61 (2011).
[11] Arau, H. ABC de la Acústica Arquitectónica. Ediciones Ceac. Barcelona, España, 1999.
[12] Long, M. Architectural Acoustics. Academic Press. EE. UU, 2006.
[13] https://arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_100.pdf (visitada 30/07/15)
[14] Tesis doctoral "La Acústica en Espacios Religiosos Católicos: Iglesias Gótico Mudéjares", consultada en http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/2226/la-acustica-en-espacios-religiosos-catolicos-iglesias-gotico-mudejares/ (visitada 30/07/15).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# LA ACÚSTICA DE LAS IGLESIAS PRERROMÁNICAS HISPANAS EN SU ESTADO PRIMITIVO

**PACS: 43.55.Ka**

Pedrero González, Antonio; Díaz Sanchidrián, César; Díaz-Chyla, Alexander; Navacerrada Saturio, María de los Ángeles.
Grupo de investigación en acústica arquitectónica
Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid
E-mail: arquilav.arquitectura@upm.es

## ABSTRACT

One of the most interesting applications of acoustic virtual reality technologies is the possibility to recover the original sound of historic buildings that have been lost or have undergone alterations over time.
In recent research, the acoustic virtual reality technologies have been used to recreate the sound of several hispanic Pre-Romanesque churches in their original state. In this paper, the acoustic characteristics have been analysed and compared against their present state. Furthermore, the suitability of these buildings for the performance of old hispanic religious rites is evaluated.

## RESUMEN

Una de las aplicaciones más interesantes de las tecnologías de realidad acústica virtual es la posibilidad de recuperar la acústica original de edificios históricos que se han perdido o que han sufrido modificaciones a lo largo del tiempo.
En un proyecto de investigación llevado a cabo recientemente, las tecnologías de realidad acústica virtual se utilizan para reconstruir el sonido primitivo de un grupo de iglesias prerrománicas hispanas. En este trabajo se analizan sus características acústicas y se comparan con las que presentan las mismas iglesias en su estado actual. Además, se evalúa la idoneidad de estos espacios para el desempeño de las actividades litúrgicas propias del antiguo rito hispánico.

## INTRODUCCIÓN

La singularidad del proceso histórico-cultural de la Península Ibérica en la Alta Edad Media, hace del prerrománico hispánico uno de los periodos más complejos de la historia del arte occidental, dando como resultado una arquitectura única, absolutamente diferente a la que se producía contemporáneamente en otros territorios. Las iglesias son las construcciones más representativas de este periodo y deben su originalidad a la mezcla de influencias de las diferentes culturas presentes en la Península Ibérica en los primeros siglos de la cristiandad. A

la tradición constructiva hispanorromana se añaden elementos de influencia bizantina, norteafricana y andalusí, lo que confiere a este arte una gran riqueza de elementos y técnicas constructivas.

Recientemente se ha llevado a cabo un proyecto de investigación con el objetivo de reconstruir, por medio de la auralización, el sonido de las iglesias prerrománicas en su estado primitivo. Para ello, a partir de la documentación arqueológica existente, se han generado modelos acústicos digitales de un grupo representativo de estas iglesias. Se han efectuado grabaciones anecoicas de la música del rito que se celebraba en ellas en la Alta Edad Media y se han realizado diferentes auralizaciones que representan las configuraciones litúrgicas habituales del antiguo rito hispánico.

En este trabajo se comparan las características acústicas de estas iglesias en su estado actual, determinadas mediante mediciones *in situ*, con las de las mismas iglesias en su estado original, obtenidas a partir de los modelos acústicos digitales. También se discute la idoneidad de estos espacios para las funciones litúrgicas para las que fueron diseñadas.

## LAS IGLESIAS PRERROMÁNICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Aunque los primeros edificios de culto cristiano en Hispania datan de los siglos IV y V, las construcciones de esta primera época responden básicamente a los estándares de la construcción romana. No es hasta el siglo VI, bajo la dominación visigoda, cuando las iglesias hispanas comienzan a adquirir características diferenciadoras asociadas a las particularidades litúrgicas del Rito Hispánico, que es la liturgia que celebraban los cristianos de la Península Ibérica hasta su abolición a finales del siglo XI. A tenor de los restos arqueológicos existentes, el número de iglesias construidas en este periodo es muy grande, sin embargo una buena parte de los edificios han desaparecido y los que se han conservado han sufrido modificaciones importantes con respecto a su estado primitivo.

A diferencia de las iglesias de periodos históricos posteriores que respondían a patrones constructivos uniformes, la característica principal de las iglesias prerrománicas hispanas es la heterogeneidad en cuanto a sus características geométricas y a sus técnicas constructivas, lo que hace que no sea posible establecer un estereotipo que las represente.

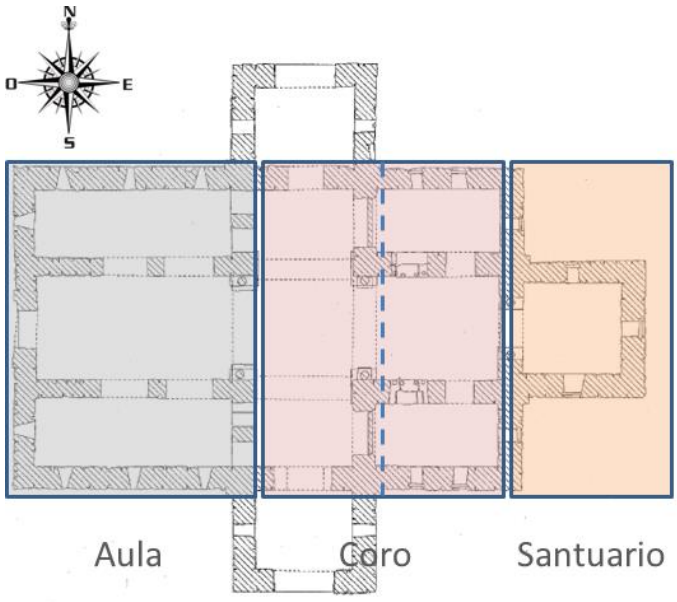



Figura 1. Ejemplo de delimitación de los espacios litúrgicos en una iglesia prerrománica.

Pese a la heterogeneidad de la forma de las iglesias de este periodo, todos los trabajos publicados coinciden en destacar, como denominador común de estos edificios, la fuerte jerarquización de sus espacios. Las iglesias prerrománicas hispanas se dividen en tres espacios litúrgicos fundamentales [1] [2] [3]: el santuario, donde se ubica el altar y que es ocupado por el o los celebrantes; el coro es el lugar ocupado por el clero y podría estar dividido a su vez en dos zonas que separarían a los clérigos en función de su jerarquía eclesiástica; y por último, el aula, que es donde se sitúa el pueblo asistente a los actos litúrgicos. Estos tres espacios están separados y claramente delimitados mediante canceles.

En cuanto a la ubicación de estos espacios litúrgicos en el espacio arquitectónico, el santuario se sitúa en el ábside principal, orientado hacia el Este y preside todo el edificio. El coro está pegado al ábside, ocupando el transepto cuando existe, o bien un espacio que es prolongación del ábside y que en algunos de los trabajos consultados se denomina *anteábside*. El aula ocupa el espacio más alejado del altar y se sitúa en las naves de la iglesia. La Figura 1 muestra, como ejemplo, una posible delimitación de los espacios litúrgicos en la iglesia de San Pedro de la Nave.

Para el estudio se ha seleccionado un grupo de cinco iglesias en el que se ha intentado que estén representadas las diferentes tipologías que eran habituales en estas construcciones: **San Juan de Baños**, como ejemplo de iglesia de tipo basilical de tamaño pequeño; **San Cebrián de Mazote**, representando a las basílicas de gran tamaño; **Santa María de Melque** como modelo de iglesia cruciforme; **San Pedro de la Nave** en representación de las iglesias con planta mixta y **Santa Lucía del Trampal,** debido a su singularidad estructural. La Tabla 1 presenta los parámetros más influyentes de las iglesias seleccionadas en cuanto a su comportamiento acústico, tanto en su estado actual como en el estado primitivo.

Se ha llevado a cabo una campaña de mediciones acústicas y geométricas de las iglesias seleccionadas cuyo objetivo era generar y calibrar modelos acústicos digitales de las mismas, en su estado actual. Las mediciones se han efectuado siguiendo los criterios de las norma ISO 3382-1 [4] y las directrices específicas para las mediciones acústicas en iglesias [5].

| Iglesia | Vol. ($m^3$) | Planta | Cubierta | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Actual | Primitiva |
| Santa Lucía del Trampal | 745 | Basilical | Madera | Abovedada |
| San Pedro de la Nave | 780 | Mixta | Mixta | Abovedada |
| San Juan de Baños | 928 | Basilical | Madera | Madera |
| Santa María de Melque | 1220 | Cruz | Abovedada | Abovedada |
| San Cebrián de Mazote | 2700 | Basilical | Madera | Madera |

Tabla 1. Características de las iglesias seleccionadas.

Sobre los modelos acústicos digitales de las iglesias en su estado actual, y siguiendo la documentación arqueológica existente, se han realizado las modificaciones oportunas a los modelos para que representen el estado de las iglesias en la época de su construcción. Amén de modificaciones geométricas que han sido más importantes en unas iglesias que en otras, las principales diferencias, desde el punto de vista de su comportamiento acústico, entre el estado actual y el primitivo de los recintos son los recubrimientos de las paredes interiores y la compartimentación física de los espacios. Actualmente, todas las iglesias seleccionadas presentan en sus paramentos la piedra desnuda. Sin embargo, en la opinión de la mayoría de los investigadores, en su estado primitivo, las paredes interiores estarían enlucidas y profusamente pintadas [6] [7]. Por otra parte, los tres espacios litúrgicos de los que se ha hablado anteriormente estarían separados mediante canceles. Estos estarían formados por unas placas de piedra o de madera en su parte inferior y, al menos los que separaban el santuario del coro, por unos cortinajes en la parte superior que ocultarían la vista en momentos determinados de la liturgia.

## LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS IGLESIAS EN SU ESTADO PRIMITIVO

Como primera conclusión, podemos decir que, en sus condiciones originales, las iglesias presentaban un comportamiento acústico más reverberante que en el estado actual. Los *tiempos de reverberación* son superiores en todas las bandas de frecuencia, especialmente en las bajas frecuencias, lo que conferiría a la reverberación de estos espacios un carácter más grave. Todo esto se aprecia en la Figura 2, en la que se comparan los valores de $T_{30}$ obtenidos en los modelos de los estados actuales y primitivos de las iglesias. También se puede ver cómo, en el estado primitivo, las diferencias de los *tiempos de reverberación* entre las diferentes iglesias son menos acusadas que en estado actual.

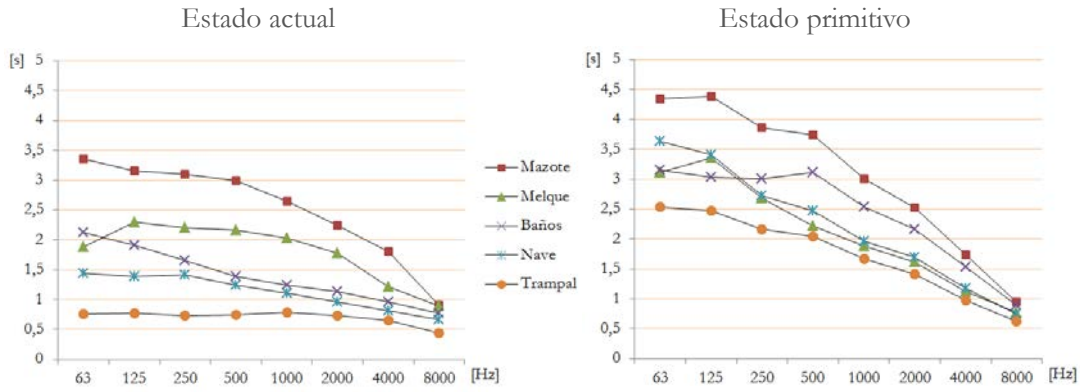



Figura 2. Valores del *tiempo de reverberación* $T_{30}$ obtenidos en los modelos del estado actual y en los modelos del estado primitivo de las iglesias estudiadas.

El aumento de la reverberación lleva asociada una disminución de la inteligibilidad, tal y como se muestra en la Figura 3. Se puede apreciar cómo esta disminución es más notoria en las iglesias de menor volumen, lo que da como resultado que, en su estado primitivo, las iglesias presentan unos valores de *STI* más uniformes entre sí que en su estado actual.

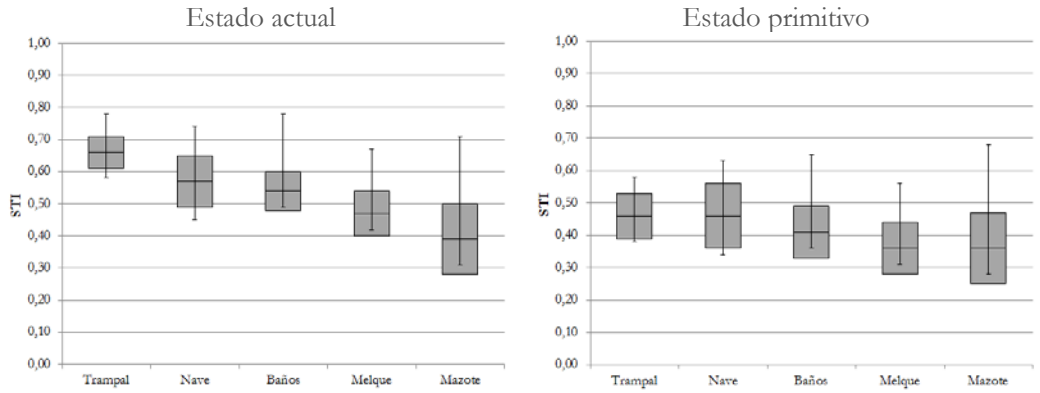



Figura 3. Diagramas de cajas de los valores del *STI* obtenidos en los modelos digitales de las iglesias en su estado actual y en su estado primitivo.

La Figura 3 también indica que la distribución espacial de la inteligibilidad no es uniforme; el promedio se sitúa, en todas las iglesias, en el intervalo de valores en el que la inteligibilidad se califica como *aceptable*; sin embargo, existe una gran dispersión de los valores de *STI*, que se evidencia en la diferencia entre los valores máximos y mínimos. Aunque los promedios están cercanos a los valores mínimos, excepto en la iglesia de San Cebrián de Mazote, ninguno de

los receptores evaluados obtiene valores de *STI* en el intervalo en el que la inteligibilidad se califica como *mala*.

El incremento de la energía reverberante con respecto a la condición actual de las iglesias afecta también al resto de las magnitudes acústicas: aumentan los valores de *EDT*, $T_S$ y *G*, mientras que disminuyen los de $C_{80}$, y $D_{50}$. Como ejemplo, se presenta la Tabla 2, donde se muestran los valores promedios de las diferentes magnitudes acústicas en la iglesia de San Juan de Baños, tanto en el estado actual como en el primitivo. En el resto de las iglesias se sigue la misma tónica.

| Parámetro | | Frecuencia [Hz] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| EDT | Actual [s] | 2,04 | 1,91 | 1,61 | 1,36 | 1,27 | 1,13 | 0,96 | 0,79 |
| | Primitivo [s] | 3,18 | 3,08 | 2,97 | 3,03 | 2,49 | 2,15 | 1,57 | 0,95 |
| $T_{30}$ | Actual [s] | 2,12 | 1,91 | 1,65 | 1,39 | 1,24 | 1,13 | 0,96 | 0,77 |
| | Primitivo [s] | 3,15 | 3,04 | 3,01 | 3,11 | 2,54 | 2,16 | 1,54 | 0,90 |
| $T_S$ | Actual [ms] | 154 | 144 | 122 | 103 | 94 | 85 | 74 | 59 |
| | Primitivo [ms] | 248 | 241 | 227 | 229 | 186 | 159 | 114 | 65 |
| G | Actual [dB] | 18,6 | 18,2 | 17,3 | 16,2 | 15,4 | 14,6 | 13,5 | 11,9 |
| | Primitivo [dB] | 19,7 | 19,6 | 19 | 18,8 | 17,6 | 16,7 | 14,9 | 11,9 |
| $D_{50}$ | Actual | 0,28 | 0,29 | 0,34 | 0,38 | 0,41 | 0,44 | 0,48 | 0,55 |
| | Primitivo | 0,16 | 0,16 | 0,19 | 0,2 | 0,24 | 0,27 | 0,36 | 0,53 |
| $C_{80}$ | Actual [dB] | -2,0 | -1,7 | -0,6 | 0,4 | 1,1 | 1,7 | 2,7 | 4,5 |
| | Primitivo [dB] | -5,2 | -5,0 | -4,3 | -4,2 | -2,9 | -2,0 | 0,0 | 3,7 |

Tabla 2. Parámetros acústicos de la Iglesia de San Juan de Baños, en sus estados actual y primitivo.

## ACÚSTICA Y LITURGIA EN LAS IGLESIAS PRERROMÁNICAS

Las iglesias prerrománicas hispanas se diseñaron para responder a las necesidades litúrgicas del antiguo rito hispánico, por lo que es lógico suponer que sus características acústicas satisfacen las expectativas aurales asociadas a los participantes de las actividades litúrgicas correspondientes. En este sentido, los oyentes se agruparían en dos subculturas auditivas diferentes: una formada por la comunidad monástica, o el clero en su caso, que dominaría el latín, que era el idioma de la liturgia; la otra está constituida por la asamblea de fieles, quienes en general desconocerían el lenguaje litúrgico. Si asociamos a cada una de estas subculturas auditivas un tipo de escucha de entre los establecidos por Chion [8], los clérigos ejercerían una *escucha semántica*, es decir, el receptor está extrayendo información a partir del sonido; sin embargo los fieles asistentes ejercerían en general una escucha reducida, que es la que se produce cuando el receptor está centrado en el propio sonido sin tener en cuenta el significado preciso que el sonido lleva asociado.

En general, estas iglesias albergaban dos tipos celebraciones litúrgicas: el rito monástico, en el que intervenía únicamente el clero, y el rito público, al que concurrían tanto el clero como la asamblea de fieles. El espacio litúrgico del rito público se correspondería con la totalidad del espacio arquitectónico de las iglesias, donde cada una de las subculturas auditivas ocuparía una zona diferente: la primera en el santuario y el coro, y la segunda en el aula. En el rito monástico, el espacio litúrgico se circunscribiría al santuario y el coro, ubicados en el ábside principal y en el anteábside (al que en algunas iglesias se añade el crucero), respectivamente.

La interpretación aural de las condiciones acústicas de las iglesias en sus condiciones originales se explica mejor observando la distribución espacial de las magnitudes acústicas a lo largo del espacio arquitectónico. Esta distribución espacial se ejemplifica en las figuras siguientes, que muestran los valores de *EDT* (para la banda de octava centrada en 1 kHz) y los

de *STI*, todos ellos obtenidos para una fuente sonora situada en el ábside principal, simulando al oficiante y con las mismas características de potencia y directividad que la voz humana.

En las figuras mostradas se aprecia una clara diferenciación de las características acústicas en las distintas zonas de las iglesias, que se corresponde con la delimitación del espacio desde el punto de vista litúrgico y que enfatizaría la jerarquización a la que se ha hecho mención anteriormente. Esta diferenciación de las características acústicas se aprecia visualmente como una variación apreciable de colores entre los de la zona sagrada, formada por el santuario y el coro, y los de la zona profana, constituida por el aula.

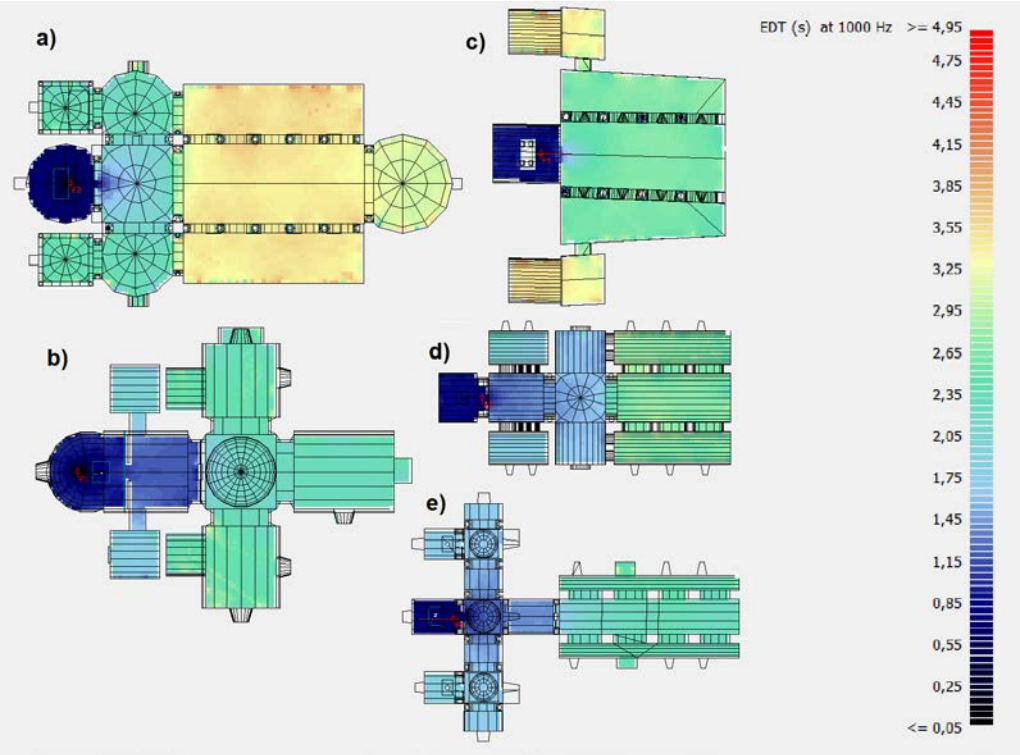



Figura 4. Distribución espacial de los valores de *EDT* en las iglesias, en su estado primitivo. a) Mazote, b) Melque, c) Baños, d) Nave, e) Trampal.

La reverberación percibida, representada mediante el *EDT* (Figura 4), es menos patente en la zona ocupada por el clero que en el aula, donde se ubica la asamblea de fieles. Cabe pensar que, para la inmensa mayoría de la población de la época, la reverberación alta sería un fenómeno poco usual, que es probable que solamente experimentaban en las iglesias. Esto seguramente contribuiría a remarcar el carácter místico de estos espacios a juicio de los asistentes a la liturgia.

A falta de un mayor conocimiento de las expectativas aurales de los participantes de la liturgia en la antigüedad, realizaremos una interpretación de la delimitación de los posibles escenarios acústicos, basada en la distribución espacial de la inteligibilidad de la palabra.

La comunidad monástica, que como hemos mencionado realizaría una escucha semántica de los sonidos producidos, demandaría un grado de inteligibilidad suficiente como para entender con facilidad el mensaje emitido. Observando las distribuciones espaciales de los valores de *STI* en las iglesias, representadas en la Figura 5, se aprecia que las zonas ocupadas por el clero tienen valores de *STI* que superan el límite inferior para una inteligibilidad *aceptable*, que está establecido en 0,45.

Las demandas de inteligibilidad del público asistente deberían ser inferiores a las de la comunidad monástica. Al no entender el idioma de la liturgia, la inteligibilidad del mensaje debería ser la suficiente para poder entonar las respuestas de la asamblea en los momentos adecuados. Con la excepción de algunos puntos situados en las naves laterales de la iglesia de San Cebrián de Mazote, los valores de *STI* obtenidos en las zonas de las iglesias destinadas a los fieles se encuadran en el intervalo entre 0,3 y 0,45, que es el que corresponde a una inteligibilidad *pobre*, pero que seguramente sería suficiente para el fin previsto. Solamente en los puntos mencionados de San Cebrián de Mazote se obtienen valores de STI inferiores a 0,3, que se asocian a una inteligibilidad *mala*.

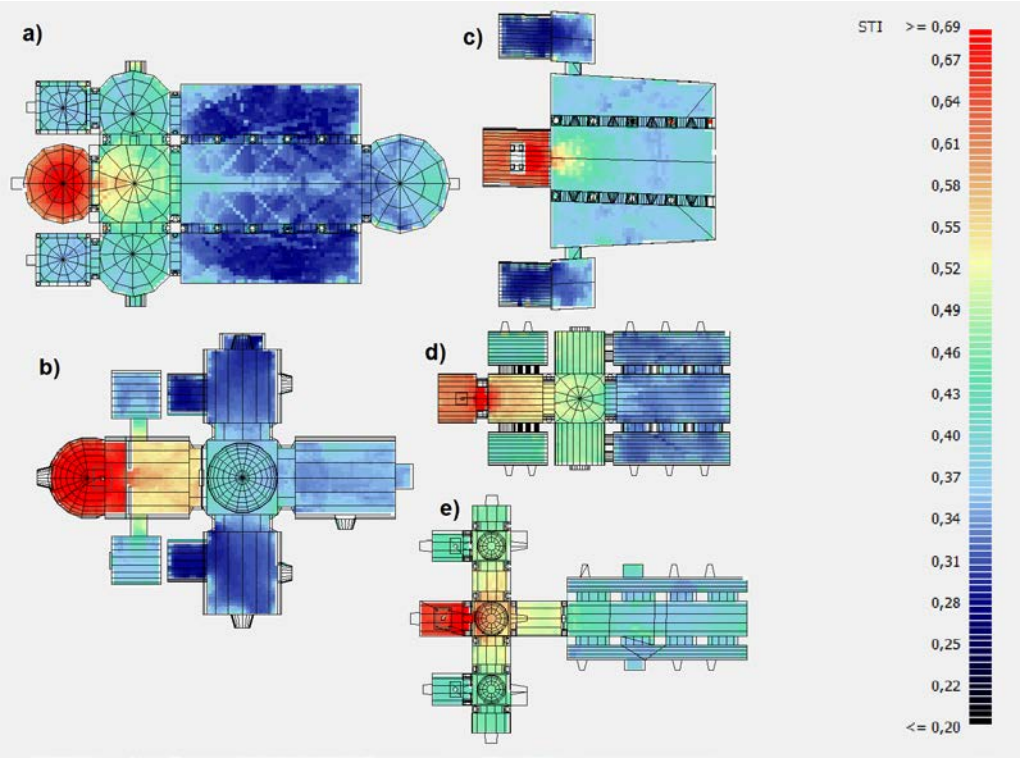



Figura 5. Distribución espacial de los valores de *STI* en las iglesias, en su estado primitivo. a) Mazote, b) Melque, c) Baños, d) Nave, e) Trampal.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, la delimitación litúrgica entre las tres zonas consideradas (santuario, coro y aula) queda totalmente patente también en la distribución espacial de las magnitudes acústicas estudiadas. Esto ocurre en todas las iglesias, a excepción de la de San Juan de Baños en la que, debido al carácter aúlico del edificio no hay evidencias de que existieran canceles que demarcasen un espacio específico para el coro. Esto hace que la reverberación percibida en todo el espacio de las naves sea prácticamente uniforme, mientras que la inteligibilidad de la palabra decrezca gradualmente con la distancia de los receptores con respecto al altar.

## CONCLUSIONES

A partir de modelos acústicos digitales se han obtenido los valores de las principales magnitudes acústicas de un grupo de iglesias prerrománicas de la península ibérica en las condiciones que estas iglesias tenían en la época que fueron construidas.

Los valores de los índices acústicos extraídos de los modelos se han comparado con los obtenidos en una campaña de mediciones acústicas in situ realizada sobre las mismas iglesias en su estado actual. De esta comparación se deduce que las iglesias, en su estado primitivo

eran más reverberantes que en su estado actual. El aumento de la reverberación hacía que las diferencias entre las características acústicas de las distintas iglesias fuese menos acusada en su estado altomedieval de lo que lo son hoy en día.

Por otra parte, se ha evaluado la idoneidad de las características acústicas originales de estas iglesias con los requerimientos acústicos de las actividades litúrgicas para las que fueron diseñadas. Se ha encontrado que las iglesias poseían zonas acústicamente diferenciadas, cuya delimitación coincide con la de los espacios en los que se ubicaban los distintos tipos de participantes en la liturgia. La zona ocupada por el clero poseía unos valores más bajos de reverberación y una inteligibilidad de la palabra elevada, lo que permitía a estos oyentes realizar una escucha semántica de los sonidos de la liturgia. La zona ocupada por los fieles se caracterizaba por una inteligibilidad más baja, pero suficiente para sus necesidades para el seguimiento del culto. Por otra parte, los valores más altos de reverberación en esta zona de las iglesias contribuirían a enfatizar el carácter místico y el dramatismo de las actividades litúrgicas del rito hispánico.

## REFERENCIAS

[1] L. Caballero Zoreda y I. Sastre de Diego, «Espacios de la liturgia hispana de los siglos V-X. Según la arqueología,» de El canto mozárabe y su entorno: Estudios sobre la música de la liturgia viejo hispánica, Madrid, Sociedad Española de Musicología (SEDEM), 2013, pp. 259-291.

[2] I. G. Bango Torviso, «La vieja liturgia hispana y la interpretación funcional del templo prerrománico,» de VII Semana de Estudios Medievales : Nájera, 29 de julio al 2 de agosto de 1996. / coord. por José Ignacio de la Iglesia , Nájera, 1997.

[3] C. Godoy Fernández, Arqueología y liturgia. Iglesias hispánicas (siglos IV al VIII), Barcelona: Universitat de Barcelona, 1995.

[4] ISO 3382-1:2009, Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces, Geneva: International Organization for Standardization, 2009.

[5] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari y P. Ricciardi, «Guidelines for acoustical measurements in churches,» Applied Acoustics, vol. 70, pp. 378-388, 2009.

[6] I. Bango Torviso, «Arte prerrománico hispano,» de Summa Artis Vol. VIII-II, Madrid, Espasa-Calpe, 2001.

[7] L. Caballero Zoreda y M. Á. Utrero Agudo, «Una aproximación a las técnicas constructivas de la Alta Edad Media en la Península Ibérica. Entre visigodos y omeyas,» Arqueología de la Arquitectura, nº 4, pp. 169-192, 2005.

[8] M. Chion, L'audio-vision (Son et image au cinema), París: Nathan-Université, 1991.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DISEÑO ACÚSTICO DE LA SALA PROMOCIÓN DEL CSI-IDEA EN ALHAURÍN DE LA TORRE (MÁLAGA)

PACS: 43.55 Fw

Atienza Jiménez, Pablo J.[1]; Blázquez Martín, Juan M.[2];
1 Arquitecto. Evaluador acreditado del Green Building Council España.
C/ Trinidad Grund 4, planta 7-3. 29001 Málaga
Tel: (0034) 666 474304
E-mail: pabloatienza @atienza-arq.com
2 Arquitecto. Máster en Ingeniería Acústica.
C/ Espíritu Santo 18 Bajo. 11.500 El Puerto de Santa María (Cádiz)
Tel: (0034) 687 911490
E-mail: info@juanblazquez.es

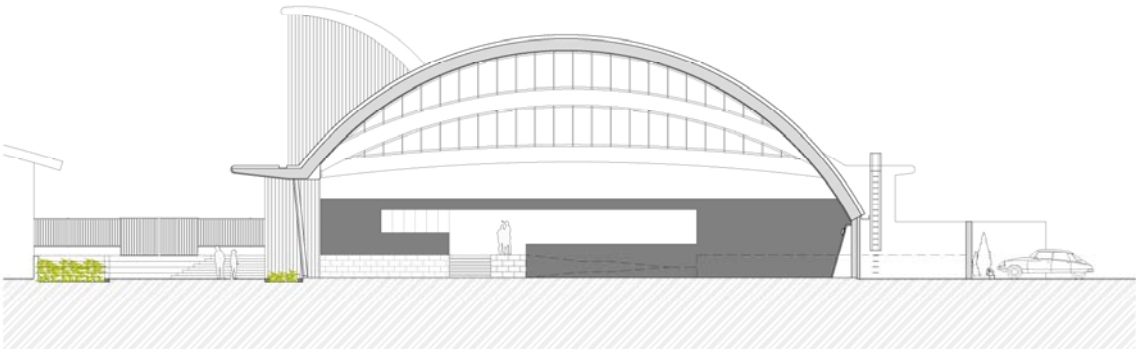
**ABSTRACT**
The design of the Promotion Space of the CSI-IDEA building in Alhaurín de la Torre (Málaga) is conceived as an open space of rectangular plant 44,00m x 28,50m, covered by a dome that reaches 12,20m high and encloses a volume of 12.500m3. The intended use of the room is a multipurpose space where the oral message has a predominant use to the musical. To achieve the desired acoustic comfort and proper speech intelligibility in an initial geometry so unfavorable, absorbent materials have been used to allow the reverberation time be sufficiently low.

**RESUMEN**
El diseño de la Sala Promoción del CSI-IDEA en Alhaurín de la Torre (Málaga) se concibe como un espacio diáfano de planta rectangular de 44,50m x 28,50m, cubierto por una bóveda que alcanza los 12,20m de altura y encierra un volumen de 12.500m3. El uso previsto para la Sala es de espacio polivalente donde el mensaje oral tiene un uso predominante sobre el musical. Para conseguir el confort acústico deseado y una correcta inteligibilidad de la palabra en una geometría inicial tan desfavorable, se ha realizado un tratamiento con materiales absorbentes que han permitido que el tiempo de reverberación sea suficientemente bajo.

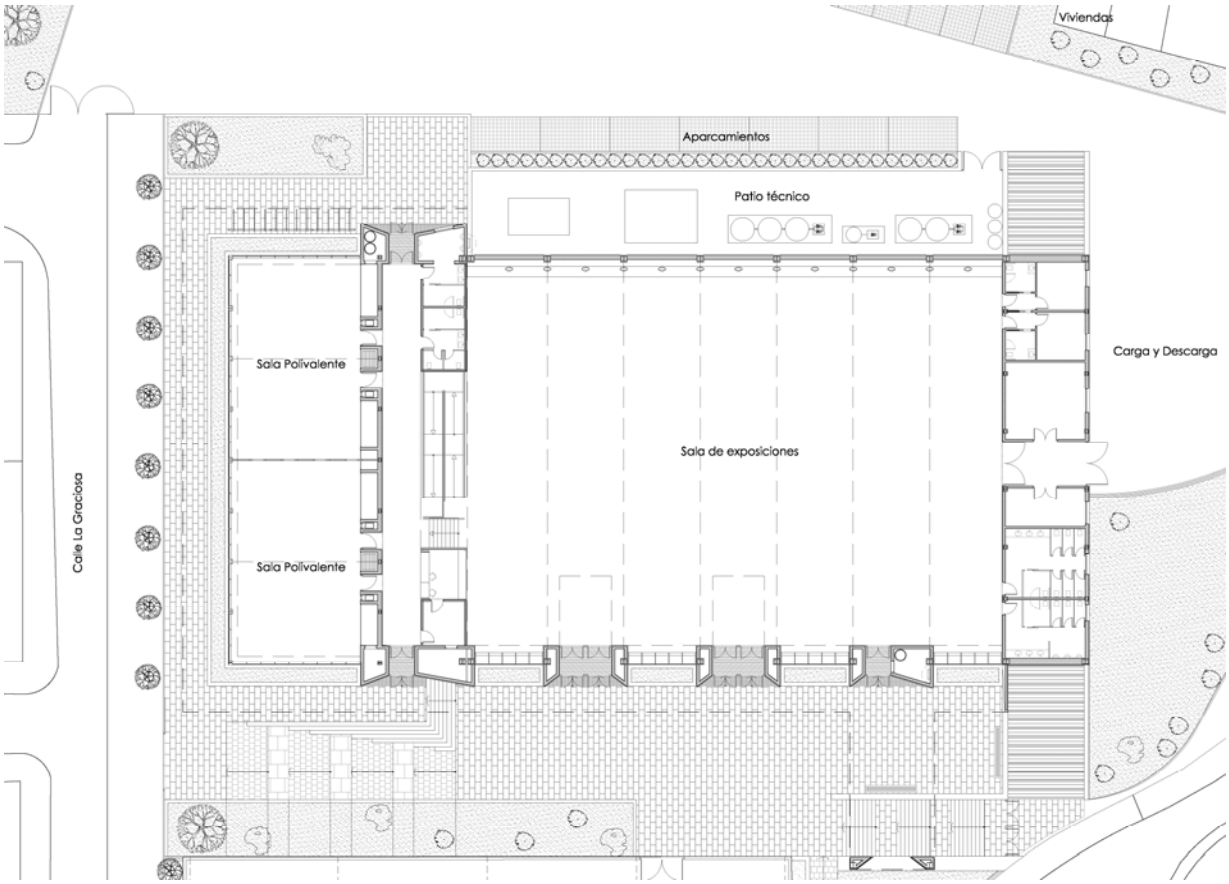


**INTRODUCCIÓN**

La sala principal del edificio tiene una planta rectangular de 38,50m de largo y 28,50m de ancho con un espacio acoplado que prolonga la sala en longitud 6m. La cubierta tiene forma abovedada por requisito proyectual. En el extremo Este arranca con 5,20m de altura hasta alcanzar los 12,20m en su punto más alto y bajar a 2,90m en el extremo Oeste. En el lado Este, la cubierta cuenta con dos elementos a modo de grandes ventanales que se elevan 8,00m sobre el extremo oeste con un ancho de 5,5m. El volumen de la sala es de 12.500m$^3$. La Sala se dedicará predominantemente para la transmisión del mensaje oral y es expreso deseo del cliente obtener un espacio lo más "sordo" posible.



Sección de la Sala Principal




Planta General del Edificio

## METODOLOGIA

### M.1 Objetivos de acondicionamiento acústico de la sala

El objetivo que se persiguen en el acondicionamiento acústico de Sala es doble, por un lado se persigue garantizar la existencia de confort acústico de modo que el campo sonoro existente no genere molestias al auditorio y por otro lado se busca asegurar la correcta inteligibilidad de la palabra imprescindible en todos los espacios donde la compresión del mensaje oral sea de capital importancia. Para alcanzar este doble objetivo será preciso que; el ruido de fondo existente en la sala sea suficientemente bajo al igual que el nivel del campo reverberante y que no existan ecos ni focalizaciones del sonido.

- Ruido de fondo

Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. Para el uso prescrito establecemos la curva NC-30 como el objetivo a satisfacer. Deberemos garantizar que el nivel de ruido de fondo, medido en cada banda de octava, esté por debajo de la curva NC-30. La equivalencia en dBA es de 42dBA. El índice de ruido día de la zona donde se ubica el edificio al tratarse de una zona residencial se puede considerar $L_d$ =60dBA. Los aislamientos previstos en la envolvente, así como la colocación de vestíbulos acústicos en todos los accesos a la sala deben garantizar una atenuación del ruido procedente del exterior suficiente para garantizar el cumplimiento de la curva NC-30.

- Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación óptimo de un recinto depende del volumen del mismo y de la actividad que se pretende desarrollar. Este criterio se refiere al valor medio del tiempo de reverberación de las frecuencias de 500 y 1000Hz y se le ha denominado $T_{MID}$. En el "ABC de la Acústica Arquitectónica", D. Higini Arau establece la siguiente fórmula, en función del volumen, para la actividad de la nuestra para salas ocupada por audiencia;

Para salas de lenguaje: teatro, conferencia…

$$T_{mid} \text{ óptimo máximo} = 0{,}368\ V^{0.1505}$$
$$T_{mid} \text{ óptimo mínimo} = 0{,}264\ V^{0.1394}$$

Por otro lado, según la formulación empírica de Pérez Miñana, el tiempo de reverberación óptimo de la sala depende además de la existencia en la misma de apoyo electroacústico.

$$T_R^{OP} = k\ u\ i\ \sqrt[3]{V}$$

| f | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| k | 1,30 | 1,15 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| u | Palabra: 0,075 | | | Música: 0,08 < u < 0,1 | | |
| i | Apoyo Electroacústico: CON → 0,85; SIN → 1 | | | | | |

SALA PRINCIPAL Volumen = 12.500$m^3$

Formulación H. Arau para salas de lenguaje.

$T_{mid}$ óptimo máximo = $0{,}368\ V^{0.1505}$ $T_{mid}$ óptimo máximo = 1,52s

$T_{mid}$ óptimo mínimo = $0{,}264\ V^{0.1394}$ $T_{mid}$ óptimo mínimo = 0,98s

Formulación Pérez Miñana para palabra con apoyo electroacústico

| F | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | $T_{MID}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_R^{OP}$ | 1,92 | 1,70 | 1,48 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,41s |

Tras analizar los distintos tiempos de reverberación óptimos para la sala estableceremos un tiempo de reverberación máximo $T_{mid}$ óptimo máximo = 1,41s. El objetivo para satisfacer los deseos expresos del cliente es obtener un Tiempo de reverberación muy inferior a ese tiempo de reverberación máximo.

- Ecos y focalizaciones

Tanto la aparición de ecos, focalizaciones del sonido y ecos flotantes son anomalías que van en detrimento del confort acústico de la sala y contribuyen a la pérdida de inteligibilidad de la palabra. La forma convexa de la bóveda que cubre la sala principal es una decisión proyectual pese a no ser una geometría ideal para un recinto óptimo a nivel acústico. Para atenuar el posible efecto se ha revestido la bóveda con una solución absorbente consistente en un falso techo de chapa perforada con lana mineral en la cámara. Para prevenir la aparición de eco flotante se ha inclinado los paramentos este y oeste que están enfrentados y se ha dispuesto un revestimiento absorbente en el paramento oeste consistente en paneles de madera perforada de SPIGOACUSTIC con lana mineral en la cámara.

- Inteligibilidad de la palabra

El objetivo respecto a la comprensión de un mensaje oral es que la inteligibilidad de la palabra sea aceptable / buena (*fair/good*). Para evaluar este parámetro determinaremos el índice RASTI (*Rapid Speech Transmision Index*). La comprensión de un mensaje oral dentro de un recinto depende fundamentalmente de la correcta percepción de sus consonantes. Un tiempo de reverberación alto, provoca que el decaimiento energético de una vocal sea más lento y se solape con la consonante emitida inmediatamente después, enmascarándola y provocando una pérdida de inteligibilidad en la sala. Este parámetro dependerá por tanto del tiempo de reverberación de la sala, así como de la diferencia de niveles de presión sonora de campo directo y campo reverberante en un punto y del ruido de fondo.

### M.2 Características acústicas de la envolvente

La envolvente de la sala está formada por las siguientes soluciones constructivas en función de ubicación;

CUBIERTA: .- Cubierta chapa sándwich.

Esta compuesta por: una chapa de acero de 0,7mm precurvado galvanizado, sándwich acústico formado por 1 capa de aislante lana mineral de 40mm de alta densidad, 1 membrana acústica de 4 mm y 1 capa de aislante lana mineral de 40mm de alta densidad y chapa de terminación de 0,7mm precurvada. El índice global de reducción acústica, ponderado A del sistema es de Ra=46,7 dBA.

CERRAMIENTOS: Existen varios tipos de cerramiento;

1.- Muro cortina y paños acristalados en la sala.

Compuesto por perfilería de aluminio o acero en función de la zona y acristalado todos ellos con doble acristalamiento de espesor total 36 mm, formado por un vidrio laminado acústico y de seguridad de 8 mm. de espesor (4+4) con butiral acústico y vidrio laminado acústico y de seguridad y de control solar 12 mm de espesor (6+6) con butiral acústico y control solar repartidos según planos de proyecto. Cámara de aire deshidratado de 12 mm con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral con silicona. El índice global de reducción acústica del sistema es Rw = 45 (-2, -6) dB

2.- Vestíbulos previos de acceso.

Todos los accesos al edificio disponen de vestíbulos acústicos formados por dobles carpinterías de aluminio acristaladas con vidrio laminar acústico y de seguridad compuesto por dos vidrios de 5 mm de espesor unidos mediante lámina de butiral de polivinilo acústico. El índice global de reducción acústica del vidrio tanto de la hoja interior como el de la hoja exterior es Rw = 38 (-1, -2) dB. El vestíbulo dispone de un falso techo absorbente ejecutado con chapa metálica perforada y material absorbente en la cámara. El índice global de reducción acústica del sistema es Rw = 42 (-1, -2) dB.

3.- Fachada ciega a Noroeste.

Ejecutado con fábrica de bloques huecos de hormigón gris estándar de 40x20x30 cm. recibidos con mortero de cemento CEM II/B-M 32,5 N y arena de río M-5, rellenos de hormigón de 330 kg. de cemento/m3. de dosificación y armadura según normativa y enfoscado exteriormente con mortero de cemento maestreado y fratasado M-10.El índice global de reducción acústica del sistema es Rw = 52 (-1, -4) dB.

### M.3 Características acústicas de los revestimientos interiores

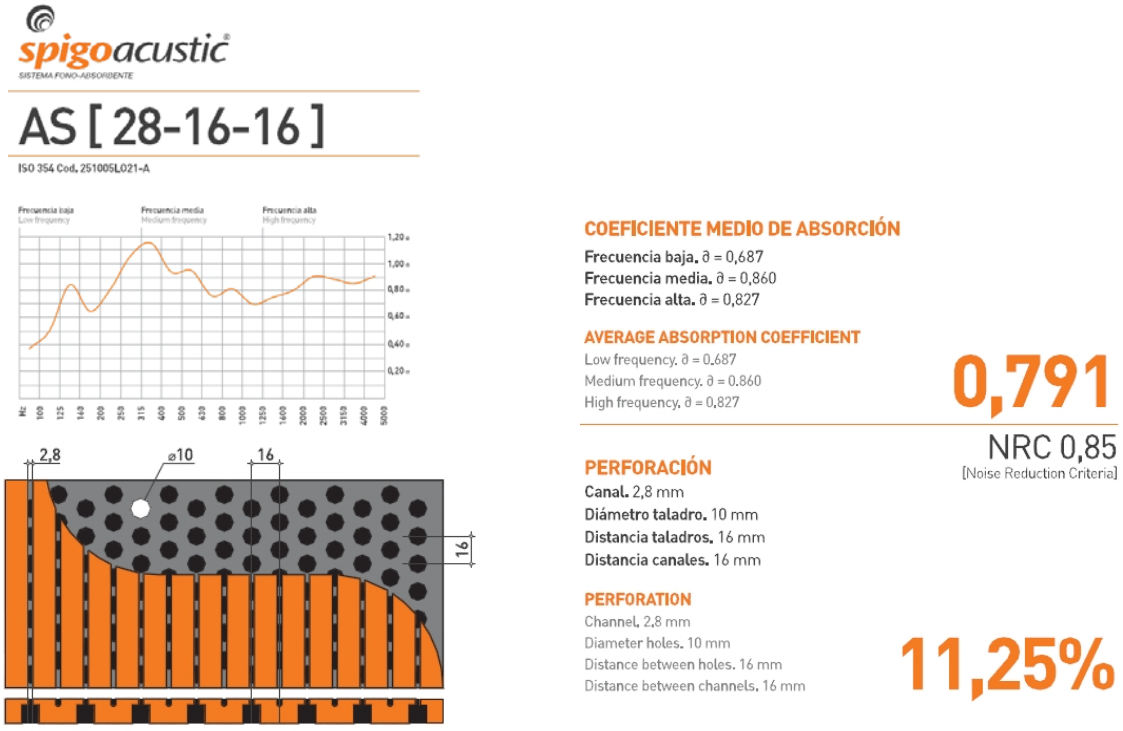
Las características acústicas de los revestimientos interiores son fundamentales para definir el acondicionamiento acústico de cada estancia. Exponemos a continuación los revestimientos utilizados en el edificio a los que se les ha exigido prestaciones acústicas.

1.- Revestimiento de madera perforado en sala principal

Sobre paramentos interiores de la sala principal se ha previsto disponer un revestimiento SPIGOGROUP realizado con paneles SPIGOACUSTIC de madera perforada con certificado FSC modelo AS (28-16-16), acabado en Melamina, sobre soporte M.D.F. Ignífugo M-1/B,s2,d0 de 16 mm. de espesor, con velo negro fonoabsorbente termoadherido al dorso de las placas, lana mineral de 65mm. La absorción acústica en bandas de octavas considerada es;

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Revestimiento de madera perforada + 65mmLM | 0,70 | 0,95 | 0,95 | 0,75 | 0,86 | 0,87 |

La superficie de este revestimiento en la sala principal es de 720,34m2.




2.- Falso techo de sala principal.

La cubierta de la sala principal abovedada se revestirá con un falso techo de chapa metálica perforada absorbente acústico compuesta de abajo hacia arriba por; chapa de acero de 0,7mm precurvado perforado lacada, velo acústico, 2 mantas contrapeadas de aislante de lana mineral de baja densidad de espesor 120mm, cámara de aire 35cm.

La absorción acústica en bandas de octavas considerada es;

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Falso techo chapa perforada + 240mm LM + Cámara 350mm | 0,27 | 0,78 | 0,66 | 0,73 | 0,61 | 0,48 |

La superficie de este revestimiento en la sala principal es de 1.662,18m2.

3.- Superficies acristaladas.

La absorción acústica en bandas de octavas considerada en las superficies acristaladas del edificio es;

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Superficies acristaladas | 0,18 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |

La superficie de este revestimiento en la sala principal es de 432,53m2.

4.- Pavimento de sala principal.

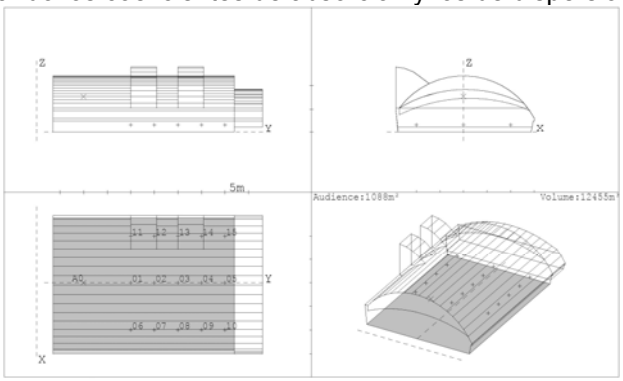
La absorción acústica en bandas de octavas considerada para el hormigón coloreado con polvo de cuarzo en la sala principal es;

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pavimento de hormigón | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |

La superficie de este revestimiento en la sala principal es de 1105,50m2.

**M.4 Cálculo de parámetros acústicos de la Sala Principal**

Para la evaluación de los parámetros acústicos de la sala principal se ha utilizado un programa de cálculo informático de simulación y auralización del campo acústico interior de recintos. Se basa en la teoría geométrica (ray tracing) mediante el trazado de rayos. El modelo geométrico de la sala se construye mediante planos. Las propiedades acústicas de los cerramientos se caracterizan especificando los coeficientes de absorción y los de dispersión acústica.



- El tiempo de Reverberación.

El tiempo medio de reverberación obtenido en la sala para los 15 receptores evaluados y según los distintos criterios de cálculo informático son;

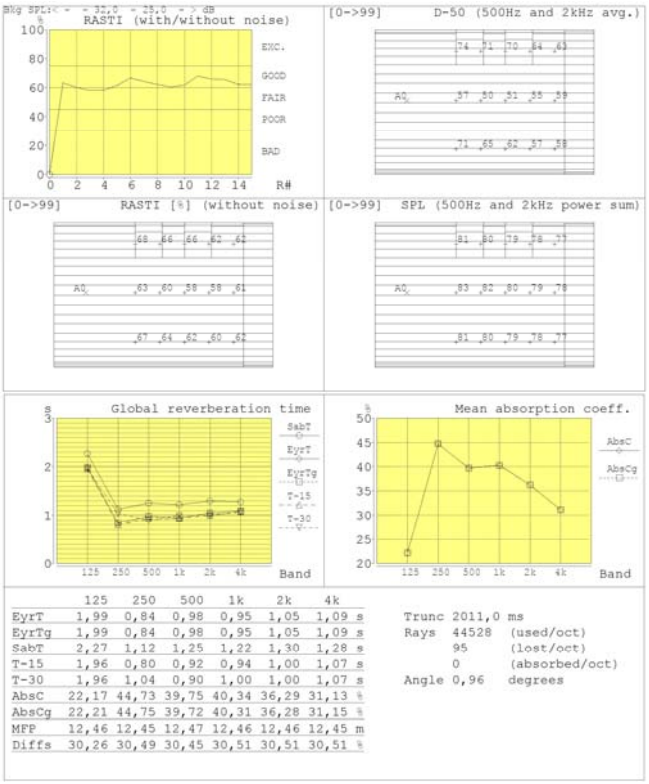
$T_{mid}$ EyrT (basado en la fórmula de Eyring) = 0,96s
$T_{mid}$ EyrTg (basado en la fórmula de Eyring) = 0,96s
$T_{mid}$ SabT (basado en la fórmula clásica de Sabine) = 1,23s
$T_{mid}$ T-15 (cálculo informático) = 0,93s
$T_{mid}$ T-30 (cálculo informático) = 0,95s

- Ecos y focalizaciones

Analizado los ecogramas de los distintos receptores evaluados no se observan ecos ni focalizaciones que puedan afectar al confort acústico de la sala.

- Inteligibilidad de la palabra

El índice RASTI indica que el grado de comprensión de un mensaje oral en el recinto será aceptable / bueno.




| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EyrT | 1,99 | 0,84 | 0,98 | 0,95 | 1,05 | 1,09 | s |
| EyrTg | 1,99 | 0,84 | 0,98 | 0,95 | 1,05 | 1,09 | s |
| SabT | 2,27 | 1,12 | 1,25 | 1,22 | 1,30 | 1,28 | s |
| T-15 | 1,96 | 0,80 | 0,92 | 0,94 | 1,00 | 1,07 | s |
| T-30 | 1,96 | 1,04 | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 1,07 | s |
| AbsC | 22,17 | 44,73 | 39,75 | 40,34 | 36,29 | 31,13 | % |
| AbsCg | 22,21 | 44,75 | 39,72 | 40,31 | 36,28 | 31,15 | % |
| MFP | 12,46 | 12,45 | 12,47 | 12,46 | 12,46 | 12,45 | m |
| Diffs | 30,26 | 30,49 | 30,45 | 30,51 | 30,51 | 30,51 | % |

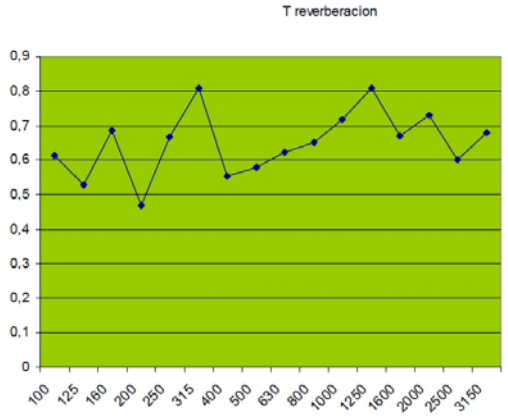
Trunc 2011,0 ms
Rays 44528 (used/oct)
95 (lost/oct)
0 (absorbed/oct)
Angle 0,96 degrees

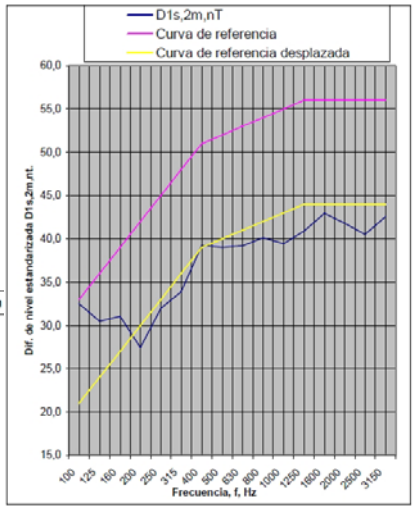
**RESULTADOS**

Se ha realizado dos ensayos de tiempo de reverberación en la Sala por sendos laboratorios acústicos y un ensayo de aislamiento de la fachada principal de la Sala.

- Resultados de ensayos realizado por Cemosa el 19/02/14;

| Frecuencia | | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Medida | **T20(s)** | **0,61** | **0,53** | **0,69** | **0,47** | **0,67** | **0,81** | **0,55** | **0,58** | **0,62** | **0,65** | **0,72** | **0,81** | **0,67** | **0,73** | **0,60** | **0,68** |
| | Lb | 23,6 | 21,9 | 16,7 | 15,4 | 15,9 | 15,3 | 13,3 | 14,1 | 13,4 | 13,1 | 14,8 | 15,0 | 14,2 | 13,5 | 12,0 | 12,5 |
| **$D_{1s,2m,nT}$ (dB)** | | **32,5** | **30,5** | **31,0** | **27,4** | **32,0** | **33,9** | **39,2** | **39,0** | **39,2** | **40,1** | **39,4** | **40,9** | **42,9** | **41,8** | **40,5** | **42,6** |




T20: Tiempo de reverberación en el recinto receptor

Lb: Nivel medio de ruido de fondo en el recinto

$D_{1s,2m,nT,w}$ $(C;C_{tr})$ = 40 (-1 -3)

- Resultados del ensayo realizado por E15 Ingeniería Acústica S.L. el 18/05/15;

**Tipo de fuente acústica:** Ruido interrumpido
**Volumen del recinto:** 12500 m3

| Frecuencia f Hz | T20 (tercio de octava) s | T30 (tercio de octava) s |
|---|---|---|
| 50 | 0,88 | 1,59 |
| 63 | 0,88 | 0,91 |
| 80 | 0,77 | 0,78 |
| 100 | 0,76 | 0,75 |
| 125 | 0,78 | 0,76 |
| 160 | 0,57 | 0,61 |
| 200 | 0,62 | 0,66 |
| 250 | 0,64 | 0,61 |
| 315 | 0,59 | 0,61 |
| 400 | 0,60 | 0,62 |
| 500 | 0,57 | 0,61 |
| 630 | 0,54 | 0,63 |
| 800 | 0,62 | 0,74 |
| 1000 | 0,71 | 0,92 |
| 1250 | 0,79 | 0,93 |
| 1600 | 0,84 | 0,97 |
| 2000 | 0,73 | 0,86 |
| 2500 | 0,68 | 0,80 |
| 3150 | 0,74 | 0,86 |
| 4000 | 0,68 | 0,77 |
| 5000 | 0,60 | 0,64 |




| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Valoración según Norma ISO 3382:** | $T_{20,\ med(400\text{-}1250)}$ = | **0,64 ± 0,02 s** | $T_{30,\ med(400\text{-}1250)}$ = | **0,74 ± 0,01 s** |
| **Valoración según Decreto 6/2012 y CTE:** | $T_{20\ (500,1k,2k)}$ = | **0,67 ± 0,02 s** | $T_{30\ (500,1k,2k)}$ = | **0,80 ± 0,01 s** |
| **Valoración tradicional:** | $T_{20,\ mid\ (500,1k)}$ = | **0,64 ± 0,02 s** | $T_{30,\ mid\ (500,1k)}$ = | **0,77 ± 0,01 s** |
| Evaluación basada en resultados de medidas in situ obtenidos mediante un metodo de precisión | | | | |

**CONCLUSIONES**

El $T_{20mid(500,1k)}$ según el ensayo realizado por Cemosa es de 0,65s y según el ensayo realizado por estudio 15 Ingeniería Acústica es de 0,64s. Son resultados prácticamente coincidentes y dentro de rango de incertidumbre de la medida.

El $T_{30mid(500,1k)}$ solo ha sido aportado por estudio 15 Ingeniería acústica arrojando un resultado de 0,77s inferior a los 0,95s que se estimaba por el cálculo informático.

La diferencia sustancial entre el $T_{20mid(500,1k)}$ y el $T_{30mid(500,1k)}$ de 0,12s indica una doble pendiente en la curva de decaimiento energía-tiempo debida al espacio acoplado con unas características acústicas sensiblemente diferentes.

El comportamiento acústico de los materiales absorbentes colocados en la sala ha sido mejor que lo esperado por la modelización llevada a cabo con el programa informático, especialmente el del falso techo acústico y el revestimiento vertical de SPIGOGROUP de madera perforada modelo AS (28-16-16).

El aislamiento in situ a ruido aéreo de la fachada más desfavorable de la sala, considerándose ésta la fachada acristalada frente a los vestíbulos previos, arroja un resultado de 37dB a ruido de tráfico, por lo que se puede garantizar que el nivel de ruido de fondo de la Sala está por debajo de la curva NC-30 en la zona residencial donde se ubica el edificio con un índice de ruido día $L_d$ =60dBA.

El Tiempo de Reverberación representativo de la Sala Promoción del CSI-IDEA de Alhaurín de la Torre (Málaga) con un volumen de 12.500$m^3$ es de 0,77s con la sala vacía, inferior al esperado según la modelización realizada y en consonancia con los deseos del usuario final de la Sala. El aislamiento de la envolvente garantiza un ruido de fondo por debajo de la curva NC-30. Se puede garantizar por tanto el confort acústico de la sala con un grado de inteligibilidad de la palabra suficientemente bueno para ser usado como sala de conferencias o centro de convenciones donde la transmisión del mensaje oral frente al musical es preponderante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Antoni Carrión Isbert, 1998. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Ediciones UPC.
[2] Higini Arau, 1999. ABC de la Acústica Arquitectónica. Editorial Ceac.
[3] UNE-EN ISO 3382-2 Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Sala de espectáculos. Febrero 2010
[4] UNE-EN ISO 3382-2 Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Diciembre 2008
[5] UNE-EN ISO 140-5 Medición de aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Medición in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y fachadas. Mayo 1999

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# REPLANTEANDO VIEJOS PARADIGMAS EN RELACIÓN AL ACONDICIONAMIENTO EN RECINTOS BÁSICOS. ¿TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE SATURACIÓN? ¿TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE ÓPTIMO?

PACS: 43.55.Br

Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, Marisol; Calzado Estepa, Eva; Esteve Rico, Juan Carlos

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante - Edif.: Politécnica II
Universidad de Alicante - Campus de San Vicente del Raspeig.
Email: jenaro@ua.es; myebra@ua.es; evace@ua.es; estevejuancarlos@yahoo.com;

**ABSTRACT**
In this paper, we propose the possibility of establishing limits for what natural reverberation are in a common room. At these limits we have called: Optimal reverberation and Saturation reverberation time. It is chosen Sabine expression for the reverberation time as the starting paradigm. From it and others assumptions like occupation of the surfaces of the enclosure through windows, doors, cabinets, tables, etc., as usual, which average value is should have the sound absorption coefficient in determining the 'equivalent absorption area '. Thus we arrive at the proposal of an Optimal value for reverberation for speech rooms.
Saturated value for similar premises being considered, but the main hypothesis is now that the result of an action of radical conditioning by absorption only: We should not alter the nature of the living room. A graphical method is proposed and its corresponding algebraic expression also.

KEYWORDS: Sabine, optimal reverberation time, saturation reverberation time, equivalent acoustic absorption area.

**RESUMEN**
En este trabajo, planteamos la posibilidad de establecer cuáles son los límites naturales para la reverberación en una habitación de uso común. A dichos límites los hemos denominado: Tiempo de reverberación Óptimo y tiempo de reverberación se Saturación. Se escoge como paradigma de partida la expresión de Sabine para el tiempo de reverberación. A partir de él y de las hipótesis de ocupación de las superficies del recinto por ventanas puertas, armarios, mesas, etcétera, como es habitual, se encuentra qué valor promedio debería tener el coeficiente de absorción acústica al determinar el 'área de absorción equivalente'. De esta forma llegamos a la propuesta de un valor Óptimo para la reverberación en salas para palabra.
Para el valor Saturado, se barajan premisas similares pero la hipótesis principal es, que el resultado de una acción de acondicionamiento, radical, por absorción: no de debe modificar la naturaleza habitable del recinto. Se propone un método gráfico y se deduce su correspondiente expresión algebraica.

PALABRAS CLAVE: Sabine, tiempo de reverberación óptimo, tiempo de reverberación saturado, área de absorción equivalente.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de las veces que uno se enfrenta al estudio del acondicionamiento de una sala es de vital importancia conocer de antemano cuál es el valor del Tiempo de reverberación que el recinto, en cuestión, debe de tener para el uso al que está destinado, es lo que denominaremos Tiempo de reverberación óptimo ($T_r^{OPT}$). Por supuesto ese valor dependerá del tipo de actividad a desarrollar en él. En este estudio tan solo plantearemos el problema para salas de palabra. Se pretende encontrar un método que pueda indicar, de forma rápida, el valor aproximado de dicho tiempo de reverberación en función del volumen de la habitación. Existen diversas expresiones[1] que a lo largo de la historia se han propuesto para resolver este problema. Nosotros nos quedaremos con la fórmula empírica propuesta por Zamarreño y otros [1] por ser la que más se ajusta a los resultados obtenidos.

El otro problema que vamos a abordar se refiere a cuál es la cantidad de absorción que un recinto puede admitir de forma natural, entendiendo que natural se refiere a que después de la adición de materiales de absorción acústica, el recinto sigue cumpliendo con la finalidad para la que se creó sin perder su naturaleza, forma y estilo constructivo (por supuesto no estamos hablando de recintos especializados como una cámara anecoica o una reverberante), nos ceñiremos a recintos de uso común en el espacio habitado, y como ya hemos apuntado anteriormente a salas de palabra. Con esta filosofía plantearemos la posibilidad de establecer una expresión o una directriz que defina el Tiempo de reverberación de saturación ($T_r^{SAT}$).

El marco general donde nos vamos a mover será la ecuación clásica de Sabine para el cálculo del Tiempo de reverberación dada su sencillez, aún a sabiendas de sus limitaciones. Confiamos que los resultados mostrados, aunque aproximados, servirán para comprender que los problemas que presenta la reverberación excesiva no se solucionan, o son muy difíciles de resolver, planteando como única vía el aumento de absorción, de forma no deliberada, con un tratamiento superficial sobre cerramientos, objetos y mobiliario. Puesto que la mayoría de las veces el problema reside en un volumen inadecuado o excesivo número de fuentes de ruido. Y la cantidad de Unidades de Absorción - U.A. (Sabine/m$^2$) - necesarios para conseguir el tiempo de reverberación adecuado al problema, la mayoría de las veces, supera con mucho la naturaleza de la geometría del recinto.

[1] Página 116 en “Arquitectura y Energía Natural”[2].
Página 22 en “El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación”[2].
O la más clásica definida por Stephens & Bate en “Wave motion and sound” ”[3].

## PLANTEAMIENTOS Y SUPUESTOS INICIALES

- Se plantea el estudio para los siguientes volúmenes - ***V*** ($m^3$) - : 30, 90, 270, 810, 2430 y 7290.

- El área superficial con posibilidad de colocar absorción se calcula de forma aproximada con la siguiente expresión:

$$Area_{disp.} = 6*(Volumen)^{2/3}$$

- El valor del coeficiente de absorción ($\alpha$) se aproxima, en su caso, por el correspondiente a 1000 Hz por sencillez.

- El área de absorción equivalente la definimos como:

$$UA = \alpha * Area_{disp.}$$

- La expresión empírica que ya hemos referenciado, como modelo, para el tiempo de reverberación ideal:

$$T_r^{OPT} = k \cdot u \cdot \sqrt[3]{V};$$

  Donde para palabra (u = 0.075) y se estima para $k_{(1000Hz)}$ = 0.9

- La expresión del Tiempo de reverberación Sabine:

$$T_r = 0.161 \cdot \frac{V}{\sum(S \cdot \alpha)} = 0.161 \cdot \frac{V}{U.A.};$$

  Para un determinado volumen (V), la rescribiremos como:

$$y = \frac{M}{x};$$

  Donde: $y = T_r$ ; $M = 0.161 \cdot V$ ; $x = \sum(S \cdot \alpha) = U.A.$

## TIEMPO DE REVERBERACIÓN IDEAL

Si imaginamos una sala cualquiera, lo usual es que el suelo esté ocupado por mobiliario lo que impide que podamos actuar sobre la absorción de forma efectiva. Luego, están las paredes que por supuesto suelen tener ventanas, puertas, decoración, muebles, etc. Por lo que tampoco es una superficie sobre

la que se pueda actuar totalmente. El único lugar que resta libre es el techo donde si obviamos las luminarias es posible colocar material absorbente de forma generalizada. En el supuesto de que se dispusiera de algún material de $\alpha$ = 1, la superficie máxima útil ($S_u$) de que disponemos, si tenemos en cuenta los condicionantes anteriores, calculada de forma aproximada[2], rondaría los 2/5 de la superficie disponible ($S_d$), o sea:

$$\frac{S_u}{S_d} \cong 2/5 = 0.4$$

Por estas razones es por lo que en el mejor de los casos se podrá tener un alfa promedio equivalente de 0,4 para el total del recinto ($S_d$) , y eso suponiendo que se escogen concienzudamente los materiales de recubrimiento y se practica, además, alguna actuación puntual sobre los decorados o elementos auxiliares. Este resultado aproximado reforzará la consistencia de lo que vamos a plantear a continuación.

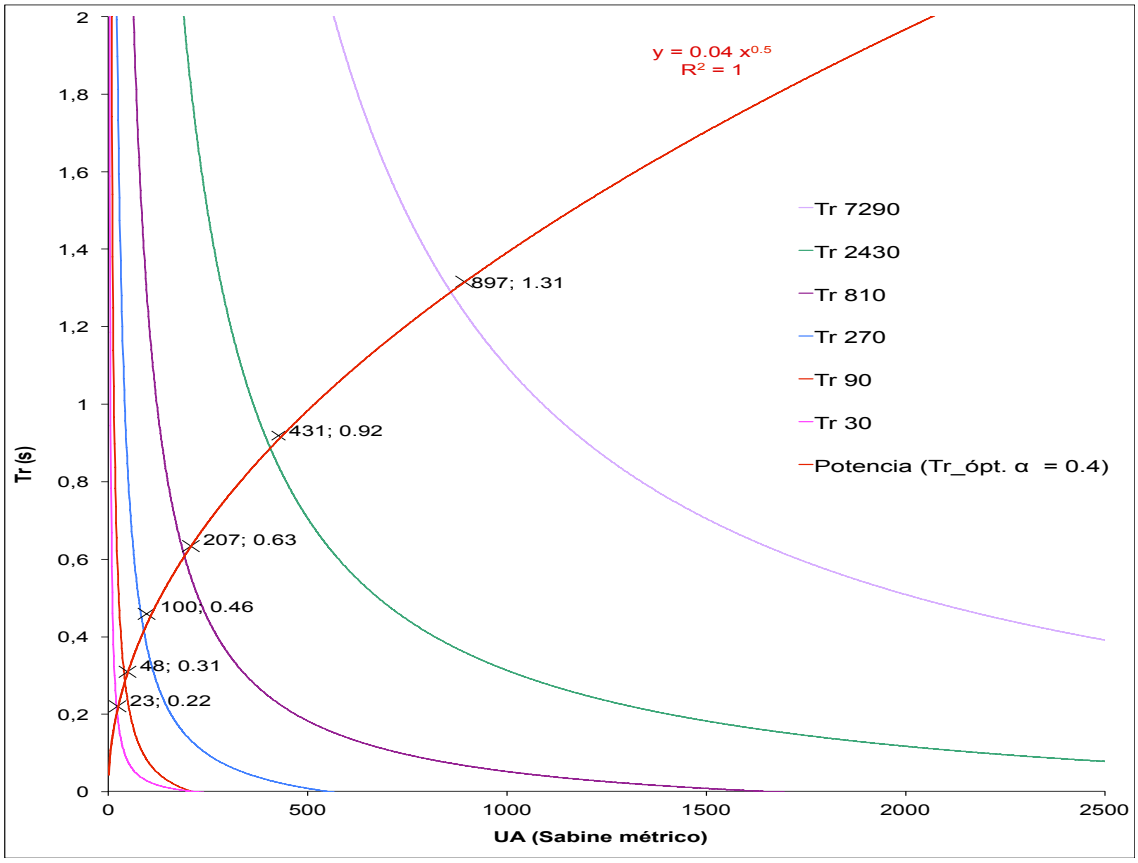
Se calculan, por medio de la relación empírica que hemos reseñado al principio [1], los tiempos de reverberación óptimos a 1000 Hz, para los volúmenes planteados. Con unas operaciones sencillas se puede extraer el coeficiente de absorción correspondiente para cada tamaño de sala, lo que podríamos llamar “coeficiente de absorción óptimo” :

| V($m^3$) | Area$_{disp.}$($m^2$) | $T_r^{OPT}$ (s) | $\alpha^{OPT}$ | U.A.($m^2$ sabine) |
|---|---|---|---|---|
| **30** | 58 | 0,2 | 0,4 | 23 |
| **90** | 120 | 0,3 | 0,4 | 48 |
| **270** | 251 | 0,4 | 0,4 | 100 |
| **810** | 521 | 0,6 | 0,4 | 207 |
| **2430** | 1084 | 0,9 | 0,4 | 431 |
| **7290** | 2256 | 1,3 | 0,4 | 897 |

Podemos observar de la tabla, que se ha construido a partir de la relación empírica, que el coeficiente de absorción óptimo obtenido es de 0.4 y que coincide con el estimado anteriormente por suposiciones geométricas de los elementos constructivos y de ocupación en una habitación. Por lo que el razonamiento que se ha hecho de cuánta superficie tenemos disponible en una habitación es coherente para el razonamiento que estamos usando en este trabajo.

[2] Techo=1 x (1/6 $S_d$);Paredes=4 x 1/3 x (1/6 $S_d$); Suelo=1 x 0 x (1/6 S $S_d$);
$S_u$=Techo + Paredes + Suelo = (7/18) $S_d$ ≈ (2/5) $S_d$

Estos resultados se marcarán en las curvas que corresponden a la representación de la variación del $T_r$, en función del área equivalente de absorción que hemos denominado 'U.A.' para cada uno de los volúmenes de interés. Veamos el aspecto:




**TIEMPO DE REVERBERACIÓN SATURACIÓN**

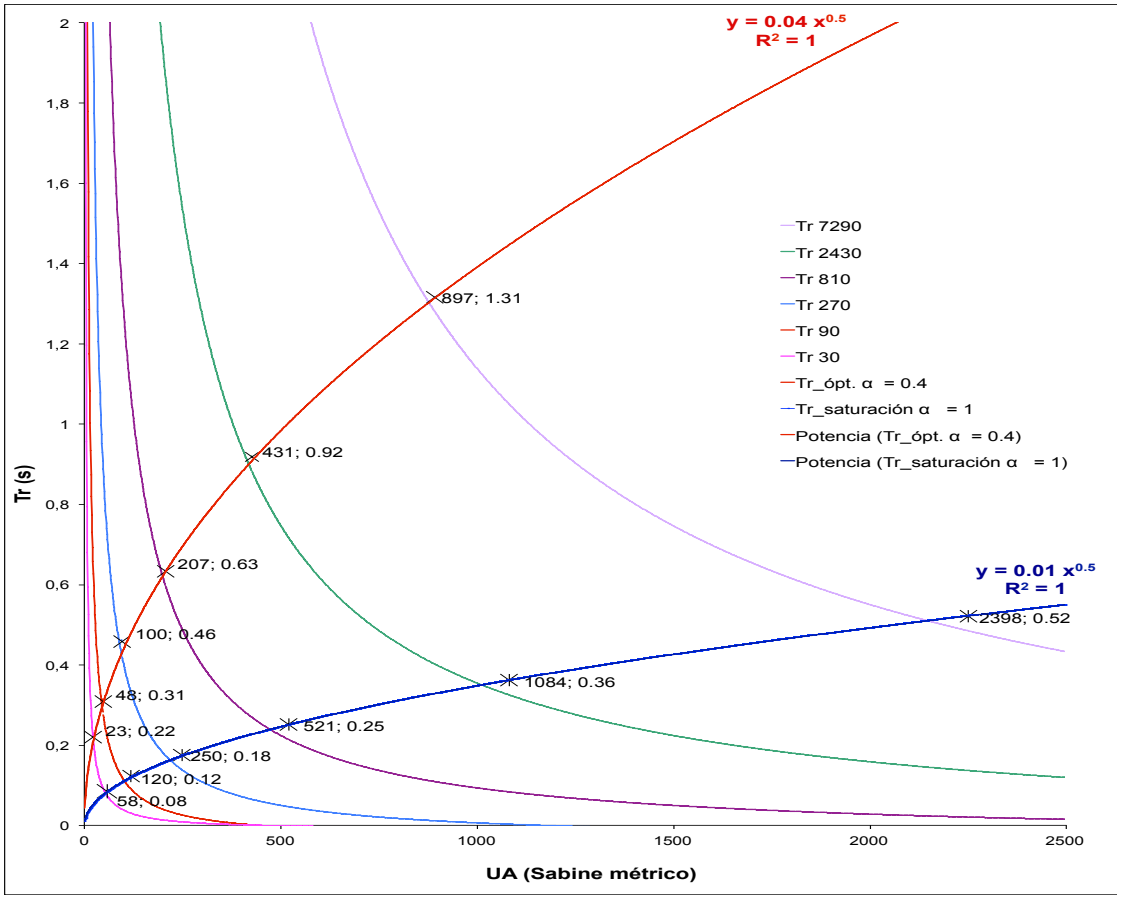
Lo vamos a definir como aquel que, podríamos calcular al aplicar Sabine para un valor de coeficiente de absorción unidad, en la totalidad de la superficie (no creo que se pueda asegurar que sea posible alcanzar la absorción máxima: alfa promedio equivalente tenga el valor de la unidad). Si imaginamos esa situación los resultados encontrados serán:

| Volumen($m^3$) | Area($m^2$) | U.A.($m^2$ sabine) | Tr_saturado (s) |
|---|---|---|---|
| **30** | 58 | 58 | 0.08 |
| **90** | 120 | 120 | 0.12 |
| **270** | 250 | 250 | 0.17 |
| **810** | 521 | 521 | 0.25 |
| **2430** | 1084 | 1084 | 0.36 |
| **7290** | 2398 | 2398 | 0.49 |

Hay que tener en cuenta que en esta situación, ya no podemos barajar la hipótesis de comportamiento difuso estadísticamente ideal para el campo

acústico: absorción total implica difusión nula. No tendría sentido hablar de reverberación. Por esta razón y por la cuestión que ya hemos comentado sobre la superficie real disponible en habitaciones comunes. Creemos que una vez que tenemos el volumen del recinto y su superficie total; es una buena aproximación decir que el tiempo de reverberación más pequeño que se podría alcanzar en el recinto, se calcula suponiendo que se actúa de forma total con materiales de absorción máxima posible ($\alpha$=1). Encontrando así un límite inferior que no se puede alcanzar nunca, en habitaciones comunes, por lo que ya hemos planteado en nuestras hipótesis.

Si ahora añadimos estos resultados a la gráfica anterior y encontramos las curvas de ajuste de regresión obtenemos:




## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con todo lo planteado hasta ahora, disponemos de una herramienta gráfica donde podemos determinar los valores del Tiempo de reverberación óptimo y de saturación: trazando sobre las curvas de Sabine para cada Volumen, las ecuaciones (ajustes potenciales) que corresponden a los supuestos de tiempo de reverberación Óptimo y Saturado. Para ello una vez que sabemos el

volumen de la sala se hace la representación en función de las Unidades de Absorción:

$$T_r = 0.161 \cdot \frac{V}{S_{total} \cdot \bar{\alpha}} = 0.161 \cdot \frac{V}{U.A.}$$

También se realiza la representación de las dos curvas de ajuste mostradas anteriormente, que las podemos reescribir de la manera siguiente:

$$T_r^{ópt.} = 0.04 \cdot (U.A.)^{0.5}; \qquad T_r^{sat.} = 0.01 \cdot (U.A.)^{0.5}$$

Entonces se encuentran los puntos de intersección, donde el valor de las 'ordenada' corresponderá con los valores buscados.

Si resolvemos algebraicamente el asunto, podemos encontrar unas expresiones, que son más directas u operativas para el calculo de los tiempos de reverberación discutidos aquí, como las que mostramos:

$$T_r^{sat.} = 0.026 \cdot \sqrt[3]{V} \qquad T_r^{ópt.} = 0.067 \cdot \sqrt[3]{V}$$

Veamos, en la siguiente tabla, qué valores se obtienen para los volúmenes elegidos calculados gráfica y algebraicamente:

| Volumen($m^3$) | Tr_sat. (s) ***gráfico*** | Tr_sat. (s) ***algebráico*** | Tr_ópt. (s) ***gráfico*** | Tr_ópt. (s) ***algebráico*** |
|---|---|---|---|---|
| **30** | **0.08** | 0.08 | **0.21** | 0.21 |
| **90** | **0.12** | 0.12 | **0.30** | 0.30 |
| **270** | **0.17** | 0.17 | **0.44** | 0.43 |
| **810** | **0.25** | 0.24 | **0.63** | 0.62 |
| **2430** | **0.36** | 0.35 | **0.91** | 0.90 |
| **7290** | **0.49** | 0.50 | **1.31** | 1.30 |

Por lo que creemos que cualquiera de los dos métodos propuestos puede ser de gran utilidad, siendo más cómodo el uso de las expresiones matemáticas mostradas últimamente. Pero no hay que olvidar que se van obtener valores aproximados centrados alrededor del comportamiento de 1000 Hz, por lo que son orientativos.

A modo de conclusión haremos las puntualizaciones siguientes:

- En los recintos de uso común tan sólo se puede disponer, aproximadamente, de un área para colocar material absorbente de unos 2/5 de la superficie total.

- El tiempo de reverberación óptimo se podría calcular suponiendo que estos 2/5 de superficie disponible tiene un coeficiente absorción acústica de 1.0
- Otra manera de hacer lo mismo, de forma más sencilla, es calcular el tiempo de reverberación óptimo mediante la fórmula clásica de Sabine suponiendo que toda la superficie tiene un coeficiente de absorción acústica alfa promedio de 0.4
- Puesto que nos parece imposible, irrealizable o poco práctico el pretender aplicar material de absorción máxima en todos los paramentos de un recinto, y aprovechando que la expresión de Sabine tiende a cero para la hipotética situación de que las unidades de absorción sean infinitas (situación irreal desde cualquier enfoque). Planteamos que el valor del tiempo de reverberación que se obtiene para un coeficiente de absorción promedio $\alpha_m$=1 en toda la superficie, es justo el tiempo donde la sala estaría saturada (ausencia de reverberación). Y que salvo para recintos especializados NO tendría sentido realizar ese intento. Ese valor lo definimos como el tiempo de reverberación de saturación. Nuestra intención en su determinación es en el sentido siguiente; que se disponga de un valor conocido que limite las pretensiones de solucionar los problemas de acondicionamiento acústico planteando tan solo el aumento de las unidades de absorción, puesto que a veces las acciones propuestas son irrealizables o en el mejor de los casos distorsionan la geometría interna del local y además económicamente muy costosas.
- Para terminar se han propuesto dos expresiones, que de forma global son capaces de determinar con suficiente aproximación los valores para los tiempos de reverberación Óptimo y Saturado discutidos en este trabajo. Dichas expresiones son muy similares a las referenciadas en la bibliografía citada con anterioridad.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Sendra, J. J.; Zamarreño, T.; Algaba, J.; Navarro, J. *El problema de las condiciones acústicas en las Iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*. I.U. Ciencias de la Construcción - ETSA (Sevilla)
[2] Serra Florensa, R.; Coch Roura, H. *Arquitectura y Energía Natural.* Ed.: UPC, 1995, Barcelona.
[3] Stephens, R.W.B. & Bate, A.E. *Wave motion and sound.* Ed.: Arnold– 1950

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ESTIMACIÓN DEL CAMPO DIRECTO "vs." CAMPO REVERBERANTE EN UN RECINTO DE PÚBLICA CONCURRENCIA DE TAMAÑO MEDIO

PACS: 43.55.Br

Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, Marisol; Eva Calzado Estepa. Esteve Rico, Juan Carlos

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la señal
Escuela Politécnica Superior de Alicante - Edif.: Politécnica II
Universidad de Alicante - Campus de San Vicente del Raspeig
Email: jenaro@ua.es; myebra@ua.es; evace@ua.es; estevejuancarlos@yahoo.com;

**ABSTRACT**

The acoustic critical distance in a room, represents the match distance between the direct field and the reverberated field sound pressure levels. This concept is derived from the assumption of a statistically perfect performance for the diffuse sound energy; where the level of direct sound field pressure is governed by the inverse square of the source-listener distance, while the value of the reverberant energy is assumed stationary at any point of the enclosure. The concern, that motivates the study presented, is born on two different grounds: the former, the acoustic teaching literatura where the concept of critical distance or 'critical radius', usually, is used as a borderline between good and bad speech intelligibility (this will be one of the issues on which we will focus our attention). Moreover, consulting more specialized literature about the real problem, when it comes to balance the direct and reverberated sound field in crowded public premises with problems of intelligibility and comfort (teaching classrooms, restaurants, etc.). This second way has been, perhaps, the trigger approach that defines this work.

We have determined the impulse response (using a MLS signal) at several locations, and so we have identified the Direct field (0 - 2 ms) and its corresponding Reverberant field (2 - ∞ ms). We have also carried out the same processing, for another time range, of what we will now call Useful field (0 - 50 ms), and Detrimental field (50 - ∞ ms) to the rest.

With the results for the match distance obtained from both perspectives, the corresponding conclusions are elaborated. Analyzing its possible use in intelligibility and comfort speech troubleshooting.

Likewise the relative behavior of both fields in the distance function is determined. Verifying that the initial (Direct and Useful) and the other field (Reverberant and Detrimental) differ in their behavior which dictate the theoretical approaches.

KEYWORDS: Reverberant field, Direct field, U50, Critical distance. Inverse square law.

**RESUMEN**

La distancia crítica en el ámbito de la acústica de recintos representa la distancia a la cual coinciden los niveles de presión sonora del campo Directo y el campo Reverberado. Este concepto se deriva de la suposición de un comportamiento difuso estadísticamente ideal de la energía sonora; donde el nivel de presión sonora del campo directo está gobernado por la inversa del cuadrado de la distancia emisor-receptor, mientras que el valor de la energía reverberante se supone estacionario en

cualquier punto del recinto. La inquietud que motiva el estudio que presentamos nace por dos razones distintas: por un lado a partir de la lectura de la bibliografía docente más accesible; en donde habitualmente el concepto de distancia crítica o radio crítico se utiliza como lugar frontera entre buena y mala inteligibilidad de la palabra (éste será uno de los asuntos sobre los que focalizaremos nuestra atención). Por otra parte la consulta de bibliografía más especializada sobre la problemática real a la hora de balancear el campo acústico directo y reverberado en problemas de inteligibilidad y confort, en recintos de pública concurrencia (aulas docentes, restaurantes, etc.), donde existen múltiples focos sonoros, este segundo enfoque ha sido quizás el desencadenante del planteamiento que define este trabajo.
Se ha determinado la respuesta impulsiva (con excitación MLS) en el plano de audiencia de varios recintos y se ha extraído el campo Directo (0 - 2 ms) y su correspondiente Reverberado (2 - ∞ ms). Se realiza el mismo procesado de la respuesta impulsiva extrayendo lo que denominaremos campo Útil (0 - 50 ms) y al resto campo Perjudicial (50 - ∞ ms). Con los resultados obtenidos se calcula la distancia en la que se igualan los campos conjugados desde ambas perspectivas y se extraen las conclusiones correspondientes.
Así mismo se analiza el comportamiento relativo de ambos campos en función de la distancia. Verificando que tanto el campo inicial (Directo y Útil) como el resto (Reverberado y Perjudicial) difieren en su comportamiento de lo que dicta su planteamiento teórico.

PALABRAS CLAVE: Campo reverberante, Campo directo, U50, distancia crítica.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento del campo acústico en el interior de un recinto es de vital importancia a la hora de analizar la problemática de la inteligibilidad o determinadas situaciones de confort acústico conversacional. En principio no se plantea la posibilidad de fuentes simultáneas de voz, por lo que sólo se ha de conocer la posición del orador principal y la de los posibles receptores del mensaje en situaciones de relaciones univocas; se supone que éstos estan distribuidos uniformemente por todo el plano de audiencia. Además se ha de conocer la geometría del recinto y las propiedades de absorción acústica de los elementos y mobiliario que lo conforman.
Desde el punto de vista teórico existe la posibilidad de obtener resultados aproximados bajo las conciciones siguientes:

- Fuente de potencia sonora puntual (propagación esférica). Decaimiento de la intensidad con el cuadrado de la distancia a al emisor.
- Conocimiento de la posición de la fuente sonora en relación a los cerramientos y obstaculos (mobiliario u otros elementos arquitectónicos). Lo que se gobierna con el factor de directividad o ganancia posicional 'Q'.
- Volumen, área de las superficies donde pueda existir reflexión, propiedades y valores de absorción acústica para dichas superficies. Se puede resumir con el conocimiento del Tiempo de reverberación Sabine.
- Para volúmenes mayores que los que aquí se tratan se deberá de tener en cuenta la absorción del aire.
- En el caso que nos ocupa el estudio del campo sonoro se hará de forma global (16 - 16000 Hz) en ponderación frecuencial lineal.

Es usual dividir el campo sonoro en dos contribuciones independientes: campo Directo y campo Reverberado. Que se definen de la siguiente manera:

**Campo Directo**: es la energía sonora en decibelios que llega al receptor sin haber sufrido reflexión en los límites u obstáculos del recinto. En el caso de que la fuente de potencia sonora tenga en sus proximidades alguna pared u otro elemento existen reflexiones muy potentes y casi simultaneas a lo que sería el rayo directo que hace que la fuente no se comporte como esférica, por lo que se modifica la premisa de fuente puntual esférica con el parametro 'Q' como multiplicador de su potencia original en función de los planos reflectantes cercanos (Q=1 →No planos, Q=2 → Un plano, Q=4 → Dos planos, Q=8 →Tres planos). Su exprexión matemática en función del nivel de potencia '$L_w$' de la fuente sonora, el factor de directividad 'Q' y la distancia receptor emisor 'r' es:

$$L_p = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right)$$

**Campo Reverberante**: es la energía sonora en decibelios que llega al receptor despues de haber sufrido al menos una reflexión (sin tener en cuenta aquellas que llegan aproximadamente simultaneas y que se engloban en la ganancia que ofrece el factor 'Q'). Para su cálculo solo se necesita conocer la superficie total 'S' que pueda provocar reflexiones en el interior del recinto:

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i$$

Y el valor promedio de la absorción acústica '$\bar{\alpha}$' para dicha superficie:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \bar{\alpha}_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i}$$

Con lo que la expresión para el campo Reverberante queda en función del nivel de potencia '$L_w$' de la fuente sonora:

$$L_p = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{4(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}}\right)$$

**Radio Crítico**: es la distancia '$r_c$' a la cual el nivel de presión sonora de los campos anteriores se iguala. También se podría decir que es la distancia a la fuente sonora a partir de la cual el campo Reverberante supera al Directo. Algunas de las expresiones habituales son:

En función de la directividad 'Q' y del area de absorción equivalente '$S\bar{\alpha}$'.

$$r_c = 0{,}14\sqrt{QS\bar{\alpha}}$$

Y si se conoce el volumen del recinto 'V', la directividad 'Q' y el Tiempo de revereberación '$T_r$'.

$$r_c = 0{,}057\sqrt{Q\frac{V}{T_r}}$$

Esta distancia o radio Crítico es habitual que se le relacione con la distancia máxima a la que se debe colocar la audiencia para obtener buena inteligibilidad. No vamos a negar que esa distancia delimita un espacio aústico excelente puesto que el campo reverberante se puede considerar inexistente o casi despreciable. Pero también es verdad que en su aspecto temporal apenas cubre dos milisegundos (2 ms) de energía

recibida y nuestro receptor fisiológico es capaz de integrar la señal de palabra durante cincuenta milisegundos (50 ms) e interpretarla como una única señal. Esta reflexión nos llevó a plantear la posibilidad de determinar exprimentalmente cuál sería la distancia, que denominaremos distancia o radio Útil '$r_u$', a la que la energía de los primeros cincuenta milisegundos (0 - 50 ms) se iguala a la energía que llega despues de ese tiempo hasta su desaparición (50 - ∞ ms). Creemos que esa distancia si que es representativa de una zona donde la inteligibilidad es suficiente, marcando la frontera con aquellas distancias que se debería evitar colocar a la audiencia en recintos de transmisión de un mensaje oral. Esta inquietud también esta reforzada por la sensación de que el cálculo de la distancia crítica apenas encierra información sobre el comportamiento acústico de una sala tan solo define de manera indirecta la relación del tiempo de reverberación frente al volumen del recinto, con unos resultados que fluctuan aproximadamente entre los cincuenta centimetros y los tres metros en la situacion más favorable, lo que ayuda muy poco en la reflexión de cuál es la colocación adecuada de la audiencia en un recinto. Además su determinación experimental no está exenta de problemática como se puede leer en [4]

Por otra parte al indagar sobre el comportamiento del campo acústico en situaciones reales en una primera instancia nos topamos con el planteamiento y análisis que se hace sobre el caso de recintos bajos y largos (Flat and Long rooms) [3] , donde se puede leer qué ocurre en determinados recintos cuyas dimensiones no cumplen los preceptos de Sabine para suponer el campo acustico reverberante perfectamente difuso[1]. Otro artículo interesante, es el compendio de Higini Arau [3] donde se citan ordenadamente todos los trabajos que existen sobre este tema hasta el año 2012. Con estas ideas en la cabeza, decidimos plantear la determinación experimental de la distribución de niveles de presión sonora en el area de audiencia para varios recintos. Una vez que se determine el mapa de presiones sonoras total, se procesarán los resultados con dos escalas temporales:

1) (0 - 2 ms) para el campo Directo[2]; (2 - ∞ ms) para el campo Reverberante.
2) (0 - 50 ms) para el campo Útil[3]; (50 - ∞ ms) para el campo Perjudicial.

De esta forma estaremos en disposición de representar graficamente los distintos niveles de presión sonora en función de la distancia fuente-receptor, y poder determinar tanto la distancia donde se igualan los campos conjugados para las dos escalas temporales propuestas. Por otro lado se podrán analizar las gráficas y comprobar si el comportamiento de sus datos corresponde a un decaimiento con la inversa de la distancia para los campos Directo y Útil. Y que los campos Reverberante y Perjudicial se mantienen constantes tal como predice su comportamiento estadísticamente difuso.

[1] Un recinto perfectamente difuso desde el punto de vista acústico es aquel para el que cualquiera de sus dimensiones (geometría rectangular) no es mayor que cinco veces alguna de las otras dos. Pagina 40 de [2]

[2] Se toma el tiempo de 2 ms para la determinación del campo directo como solución de compromiso [4] que abarque, si las hubiere, aquellas reflexiones casi simultaneas que en teoría se soluciona con el factor de directividad 'Q'. Más adelante se discutirá que problemática adicional puede producir en situaciones donde el receptor está situado próximo a algún plano reflectante, por ejemplo una mesa de trabajo o un pupitre.

[3] Este concepto se toma de la definición del índice de inteligibilidad U50 [5]

## MATERIAL Y MÉTODO

Para la realización del trabajo se ha hecho uso de la unidad de adquisición Symphonie equipada con um micrófono G.R.A.S 40AF preamplificado de media pulgada. La fuente de ruido estaba compuesta por una fuente dodecaédrica alimentada por una unidad de potencia. Se ha recogido la respuelta impulsiva a partir de una excitación MLS y se ha calculado su espectro (16 -16000 Hz) en pasos de un milisegundo mediante el paquete de software dBFA32.

Se han usado tres recintos de medida, dentro del campus de la Universidad de Alicante en San Vicente del Raspeig, en función de su accesibilidad, disponibilidad y geometría: un aula de docencia (S003-Óptica), un laboratorio (LABFIS_1-POLITÉCNICA) y un espacio deportivo (AEROBIC-POLIDEPORTIVO). Se dará una información más exhaustiva sobre la geometría, y las propiedades acústicas de sus elementos cuando estudiemos cada caso particular más adelante.

Para la toma de medidas se colocó la fuente de ruido en dos posiciones con el fin de comprobar la influencia del índice de directividad 'Q' en la distribución del campo acústico:

1) La posición "A" corresponde al caso que la fuente esta colocada a más de un metro de suelo y techo, pero justo en la esquina de la habitación (Q=4 → Dos planos reflectantes).
2) La posición "E" aproximádamente en el centro del recinto y en el punto medio de la altura de éste, por lo que se puede asumir que aproximadamente (Q=1 → Ningún plano reflectante).

La ubicación del micrófono en los recintos que estaban amueblados con mesas o pupitres, se escogió que fuera en el centro de estos elementos a una distancia de unos treinta centímetros (0.3 m).
En el caso de que la habitación estuviera exenta de mobiliario como es el caso del espacio deportivo y del aula S003 cuando retiramos sillas y mesas, se colocó el micrófono a una altura del suelo superior a un metro.
Respecto a la ubicación del micófono en el plano de la audiencia; se intentó que el mallado de puntos de recepción fuera lo más uniforme posible y siempre respetando la distribución de las mesas de trabajo que no estuvieran acupadas con algún equipamiento, tampoco se realizaron medidas en zonas de acceso o distribución (sacrificando a veces la simetría de la zona de medida respecto a la superficie del contenedor). En el plano horizontal se procuró mantener una distancia superior a los noventa centímetros (0.9 m) respecto a los cerramientos.
Con estos condicionantes se recogierón las respuestas impulsivas en el area de audiencia, la distancia se extrae de la propia respuesta impulsiva, y se realizó la represetación gráfica de su variación espacial de cada una de los campos acústicos en función de los periodos temporales ya indicados. También se ha efectuado una representación en el plano XY de forma que se pueda analizar en su caso la influencia de los límites del recinto en la distribución espacial de la energía sonora, para ello se utiliza el software SURFER con un mallado de interpolación Kriging con opciones convencionales.
A fin de caracterizar las salas también se calcula el tiempo de reverberación global promedio de cada una.

**RESULTADOS y DISCUSIÓN**

A continuación se muestra una serie de fichas donde se describe pormenorizadamente los recintos estudiados y sus características acústicas más relevantes para este trabajo. Y por supuesto la representación gráfica de los resultados obtenidos.

**1 - Aula S003 - Óptica - Con mobiliario**



largo (***L***) = 18.7 m; ancho (***A***) = 9.2 m; alto (***H***) = 2.7 m;
volumen (***V***) = 460 $m^3$; área (***S***) = 170 $m^2$;

Posición fuente 'A' [0, 0 , 1.3 ] metros;
Posición fuente 'E' [9.4, 4.6, 1.3] metros;

Posición micrófono respecto suelo 'I' [$x_i$, $y_i$, 1.1]; metros.
Las coordenadas $x_i$ e $y_i$ dependen de la ubicación de las mesas.
La distancia del micrófono respecto de la mesa es de 0.3 m.
La altura de la mesa respecto al suelo es de 0.8 m.

Número de mesas de tablero de resina fenólica (1.20 m x 0.45 m) = 75 unidades distribuidas en dos columnas dobles y una simple. Y sus correspondientes 150 sillas del mismo material (0.44 m x 0.51 m): $\cong 0.03$

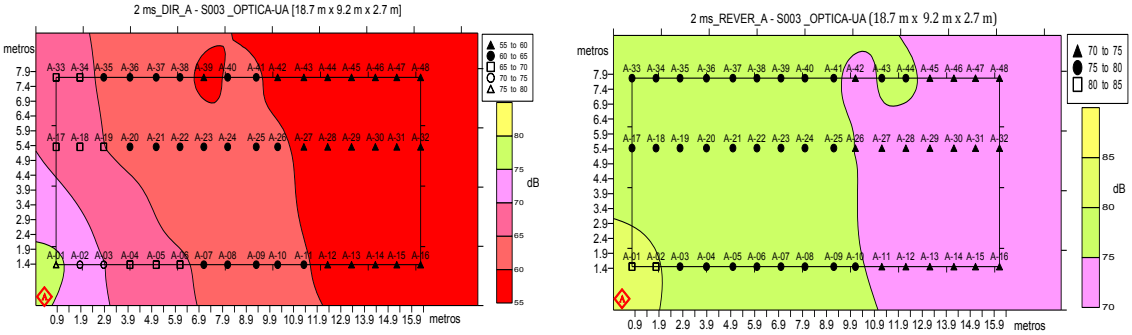
Los cerramientos laterales son de hormigon pintado: $\alpha \cong 0.02$
Los cerramintos transversales son de pladur pintado: $\alpha \cong 0.03$
El solado es de terrazo: $\alpha \cong 0.02$
El techo es registrable de escayola común (0.6 m x 0.6 m): $\alpha \cong 0.10$

El tiempo de reverberación global promedio, calculado experimentalmente, es:

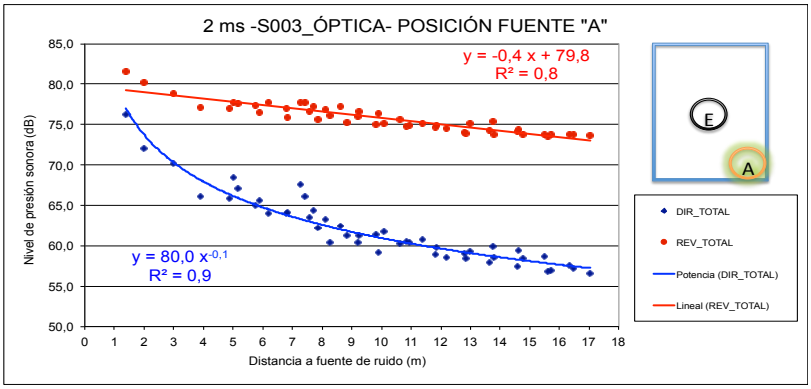
$$T_r = 1.5 \text{ s}$$

***Fuente en posición 'A'***

(0 - 2 ms) para el campo Directo.
(2 - ∞ ms) para el campo Reverberante.




Se muestra el mapa de niveles para el campo Directo y el Reverberado por separado. En ellos se pueden distinguir los puntos donde de se colocó el micrófono y una estimación del valor obtenido. La variación del Directo es de alrededor de 20 dB y la direcionalidad mostrada corresponde con lo esperado. Cabe destacar la no uniformidad del campo reverberado con un decremento de aproximadamente de 10 dB, en la gráfica siguiente se podrá acotar más este dato.
A primera vista lo más significativo que se puede extraer de la gráfica, es que el campo Reverberante no es uniforme con una pendiente de caída suave (teóricamente no debería existir dependencia con la distancia). Por otra parte el campo Directo tiene un comportamiento potencial de acorde a su definición pero su caída dista de seguir el decaimiento esperado con el cuadrado de la distancia fuente-receptor[4].



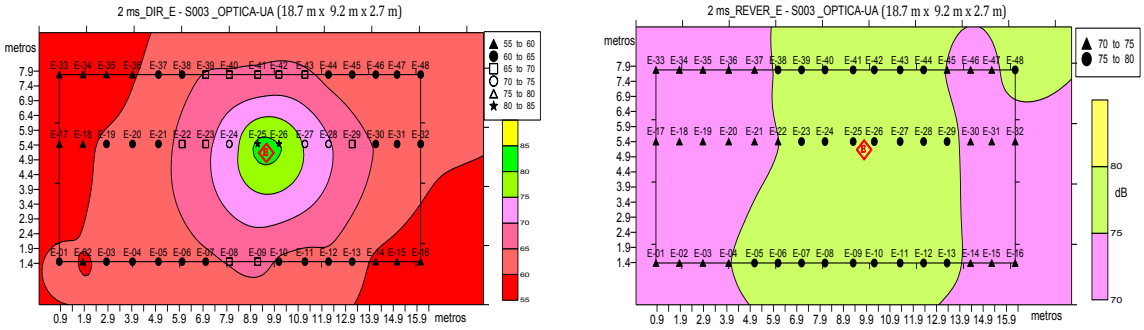

Por otro lado atendiendo al concepto de distancia o radio crítico si calculamos su valor a partir de los resultados experimentales, podemos estimar para este ejemplo un valor de $r_c^{(exp.)} \approx 1.2$ m. Si lo calculamos a través de alguna de la ecuaciones que se definieron al principio del trabajo, encontramos que el valor predicho por la teoría es $r_c^{(teó.)} \approx 1.4$ m. Se puede decir que los valores son similares.

[4] La expresión matemática para el campo acústico Directo, rescrita en su forma general desarrollada, tendría el siguiente aspecto: $L_p = a - 2\log_{10} r$ ; donde el término '*a*' comprende el nivel de potencia y la adición de otros términos logarítmicos. Al realizar el ajuste potencial de los resultados, que es el que ofrece mejores índices de regresión en Microsoft Excel, se puede decir que en dichos ajustes:

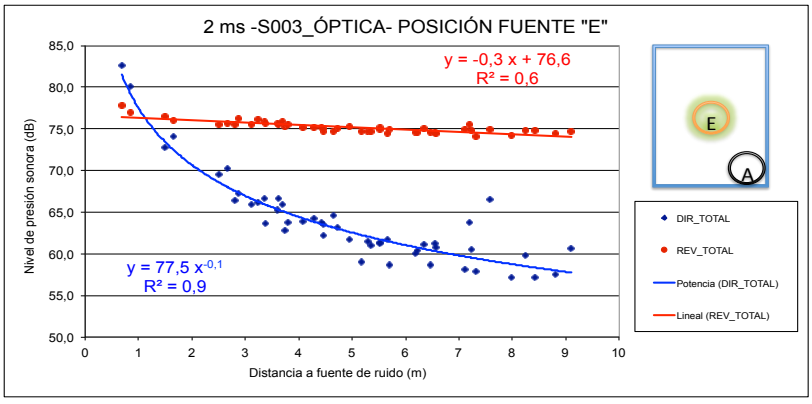
- ⇒ El factor potencial de 0.01, se traduce en que el término multiplicativo del logaritmo es exactamente 2.0 (decaimiento **cuadrático** =$1/r^{2.0}$)
- ⇒ El factor potencial de 0.2, implica que el termino multiplicativo es de 0.7 (decaimiento NO **cuadrático** =$1/r^{0.7}$)
- ⇒ El factor potencial de 0.1, implica que el termino multiplicativo es de 1.0 (decaimiento **lineal** =$1/r^{1.0}$)
- ⇒ El factor potencial de 0.05, implica que el termino multiplicativo es de 1.3 (decaimiento NO **cuadrático** =$1/r^{1.3}$)
- ⇒ El factor potencial de 0.03, implica que el termino multiplicativo es de 1.5 (decaimiento NO **cuadrático** =$1/r^{1.5}$)

***Fuente en posición 'E'***

(0 - 2 ms) para el campo Directo.
(2 - ∞ ms) para el campo Reverberante.




En este caso la distribución tiene direccionalidad esférica, no existen reflectores en el plano vertical, pero se puede observar que en los puntos cercanos a la fuente se alcanzan valores superiores a 75 dB, lo que puede ser debido a que el plano de mesas que rodea a la fuente y al micrófono proporcione esa ganancia respecto al caso anterior.
Como se puede comprobar en este caso el campo Reverberante es un poco más uniforme, debido quizás a la ubicación de la fuente ya que los cerramientos están más cerca y se recorta la posibilidad de propagación. De ahí que el intervalo de variación aparezca reducido a 3 dB apenas.

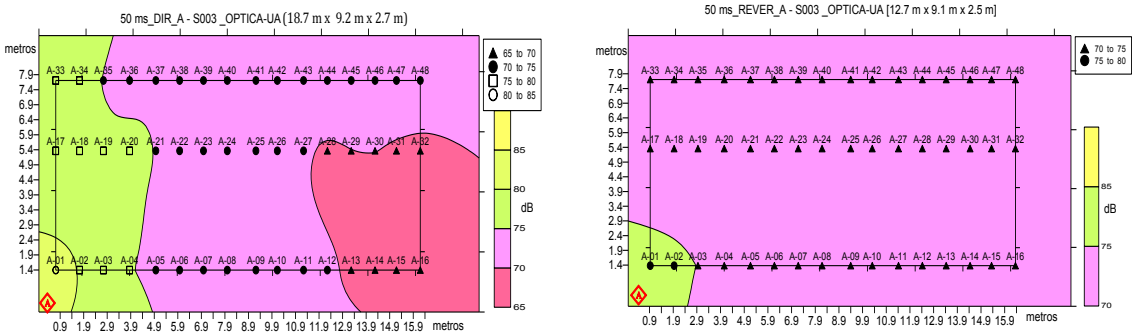



Podemos aplicar los mismos comentariós del caso 'A', mostrado anteriormente, para el comportamiento global del campo acústico; que decae ligéramente en su parte reverberada, y que el decaimiento del campo Directo sigue el mismo patrón con un ajuste potencial de exponente 0.1 que ya hemos indicado lo que significa.

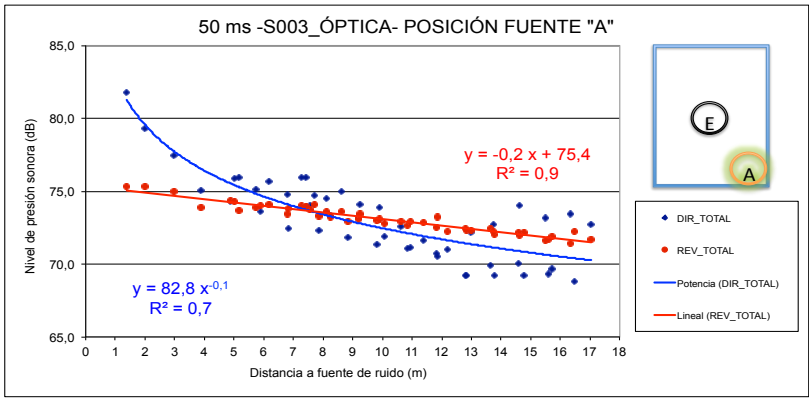
En cuanto a la distancia crítica los resultados son: $r_c^{(exp.)} \approx 1.2$ m como se observa en la gráfica; y $r_c^{(teó.)} \approx 1.2$ m en el supuesto de que la directividad 'Q' la hemos estimado como 1.5 para tener en cuenta la cercania de las mesas.

***Fuente en posición 'A'***

(0 - 50 ms) para el campo Útil.
(50 - ∞ ms) para el campo Perjudicial.




Se constata que la direccionalidad del campo Útil deja de tener simetría esférica y que los niveles aumentan sensiblemente en toda el area: como era de esperar ya que el periodo temporal de integración ha aumentado de 2 ms a 50 ms.
El campo Perjudicial salvo en posiciones cercanas a la fuente se puede decir que se mantiene constante, lo que implica que afectará de la misma forma a casi toda la audiencia.




De nuevo el mismo comportamiento con la distancia tanto para el campo Perjudicial. Así como para el campo Útil que sigue variando según un ajuste potencial análogo al resto de las situaciones mostradas hasta ahora.

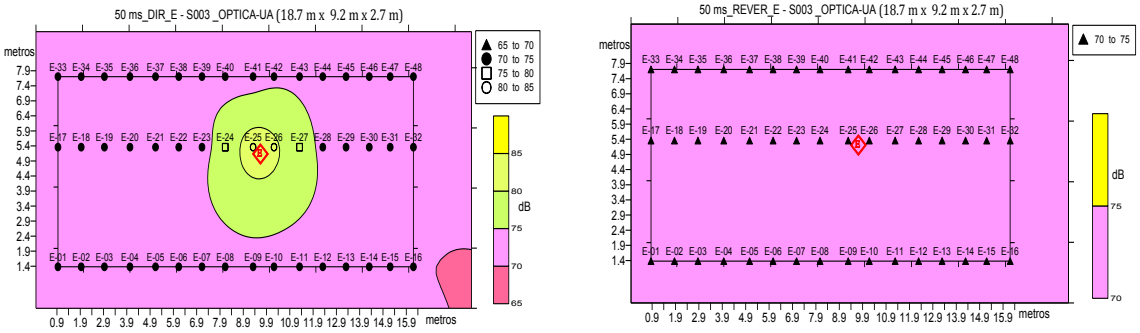
Con respecto al lugar donde los dos campos se igualan se puede ver que el resultado experimental al que denominamos ahora radio Útil '$r_u$' en vez de radio crítico, es:
$r_u^{(exp.)} \approx 7.5$ m. Recordamos que no se dispone de níguna ecuación que nos ayude a calcular este ítem de forma matemática.

Es evidente por lo menos desde nuestro punto de vista que este valor está más acorde con la realidad de lo que ocurre en un aula de este tipo donde habitualmente damos clase y hemos constatado que su funcionamiento se puede dar por bueno para los alumnos que están situados en la primera mitad del aula. Por esta razón pensamos que a la hora de calificar dentro de un recinto qué zona favorece la inteligibilidad y cuál es inservible para la docencia (transmisión mensaje oral), sería de gran ayuda el

conocer lo que proponemos como radio Útil. Y dejar de usar el radio Crítico como parámetro de calidad para evitar confusiones.

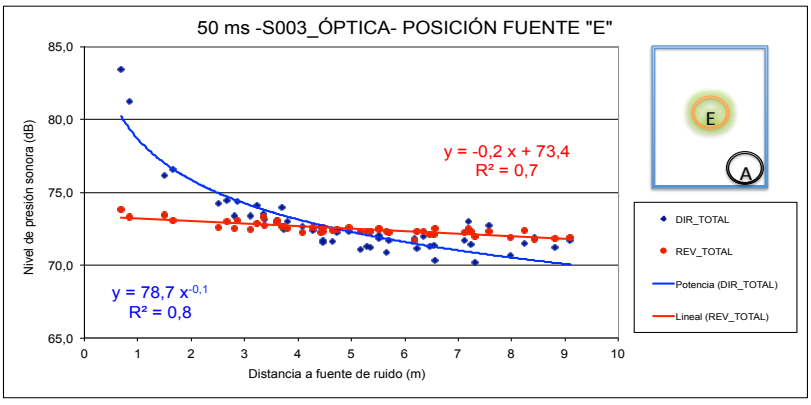
***Fuente en posición 'E'***

((0 - 50 ms) para el campo Útil.
(50 - ∞ ms) para el campo Perjudicial.




Los resultados son muy similares en comportamiento al obtenido con la fuente en 'A' pero con menos diferencia de niveles en el área de audiencia.

El campo Perjudicial sufre pocas variaciones, aunque con niveles cercanos en muchos puntos a los valores del campo Útil. Lo que hará como, comprobremos seguidamente, que lo distancia Útil sea menor para la posición de la fuente en posición central que cuando emite desde una esquina. Esta diferencia no se encontraba cuando los cáculos se hacían para el intervalo de 2 ms.




Se sigue manteniendo la misma tendencia que en los casos anteriores aunque observando ahora las gráficas de la posición 'A' y 'E' si obviamos los valores de 'posición' y 'nivel', podemos decir que su forma es idéntica. Esta especie de cambio de escala se ve reflejado en el valor estimado del radio Útil que queda reducido, en esta situación, casi a la mitad como vemos: $r_u^{(exp.)} \approx 4.5$ m.

A continuación se planteará el mismo procedimiento pero esta vez después de haber vaciado el aula de de mesas y sillas.

## 2 - Aula S003 - Óptica - SIN mobiliario



largo (***L***) = 18.7 m; ancho (***A***) = 9.2 m; alto (***H***) = 2.7 m;
volumen (***V***) = 460 $m^3$; área (***S***) = 170 $m^2$;

Posición fuente 'A' [0, 0 , 1.3 ] metros;
Posición fuente 'E' [9.4, 4.6, 1.3] metros;

Posición micrófono respecto suelo 'I' [$x_i$, $y_i$, 1.1]; metros.
Las coordenadas $x_i$ e $y_i$ siguen la cadencia de las luminarias, puesto que hemos quitado las mesas y sillas.

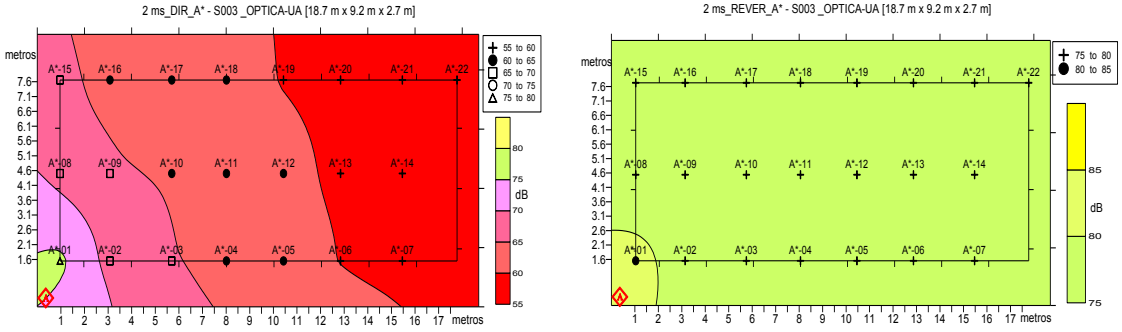
Los cerramientos laterales son de hormigon pintado: $\alpha \cong 0.02$
Los cerramintos transversales son de pladur pintado: $\alpha \cong 0.03$
El solado es de terrazo: $\alpha \cong 0.02$
El techo es registrable de escayola común (0.6 m x 0.6 m): $\alpha \cong 0.10$

El tiempo de reverberación global promedio, calculado experimentalmente, es:

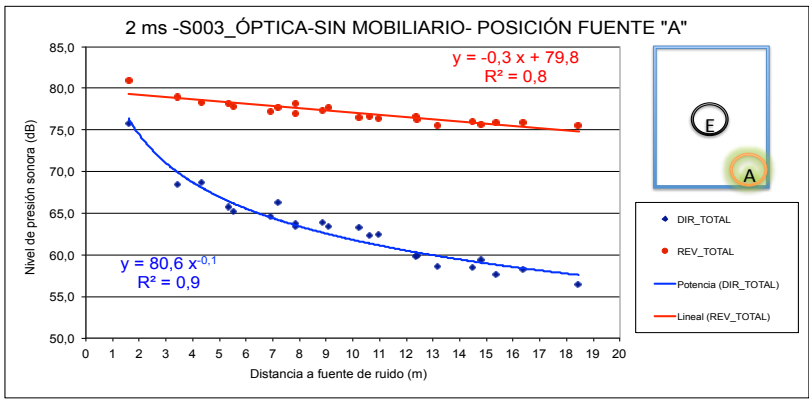
$$T_r = 1.8 \text{ s}$$

***Fuente en posición 'A'*** **- SIN mobiliario**

(0 - 2 ms) para el campo Directo.
(2 - ∞ ms) para el campo Reverberante.




A la vista de los resultados y realizando una comparación con sus homólogos en el caso de haber presencia de muebles (pag/figs) es evidente que para 2 ms el comportamiento del campo Directo es idéntico. Lo mismo se puede decir del campo Reverberante aunque ahora no decae en la parte más alejada de la fuente.



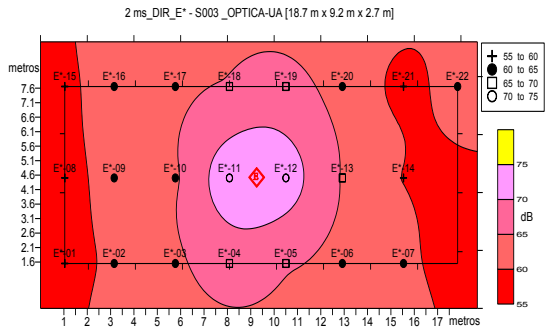

Está gráfica corrobora lo dicho en el parrafo anterior, obteniendo unos ajustes similares, la diferencia más notable es que la pendiente pasa en el campo Reverberante de -0.2 a -0.3 en este caso.

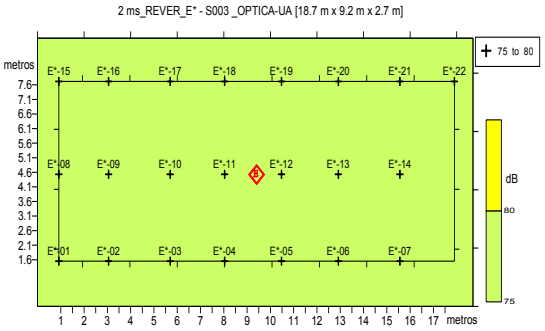
El radio Crítico experimental será: $r_c^{(exp.)} \approx 1.3$ m; lo que es coherente para un tiempo de reverberación mayor que cuando esta amueblada.

El radio Crítico teórico será: $r_c^{(teó.)} \approx 1.3$ m; como vemos coinciden aunque los cálculos son siempre aproximados.

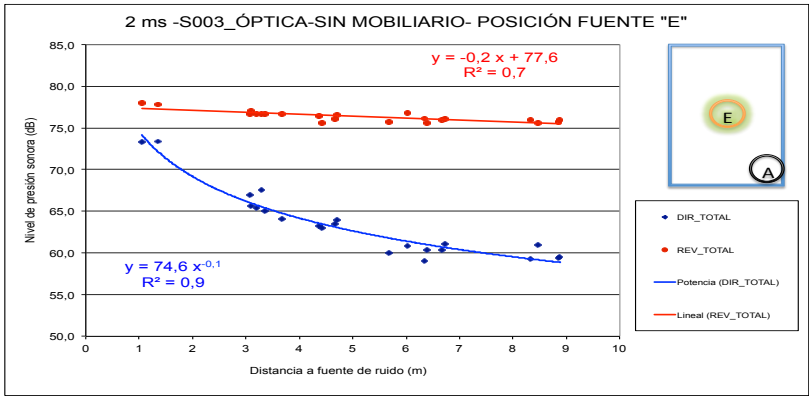
***Fuente en posición 'E'*** **- SIN mobiliario**

(0 - 2 ms) para el campo Directo.
(2 - ∞ ms) para el campo Reverberante.




Como en todas las ocasiones que tratamos el punto 'E' sin mobiliario lo más relevante es la disminución de nivel que se aprecia respecto a la presencia de este. Por lo demás tal como en la situación anterior; el campo Reverberante es más uniforme y no presenta caídas importantes en su discurso horizontal.



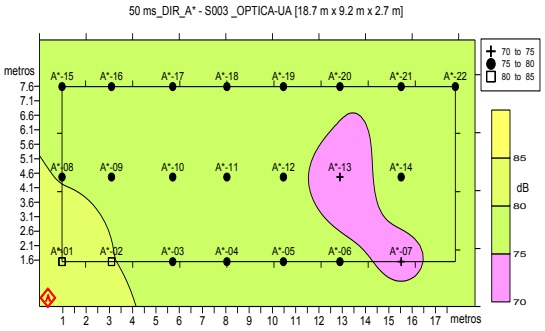

Los ajustes de los datos exprimentales vuelven a parecerse mucho a la situación amueblada y se puede hablar de una leve variación en la caída del campo Reverberante.

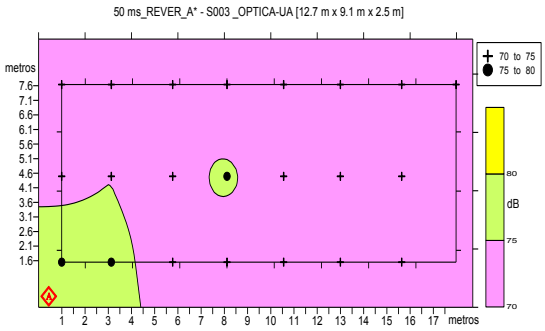
El radio Crítico experimental será: $r_c^{(exp.)} \approx 0.8$ m; lo que es coherente, de nuevo, para un tiempo de reverberación mayor que cuando esta amueblada.

El radio Crítico teórico será: $r_c^{(teó.)} \approx 0.9$ m; como vemos se aproxima al experimental.

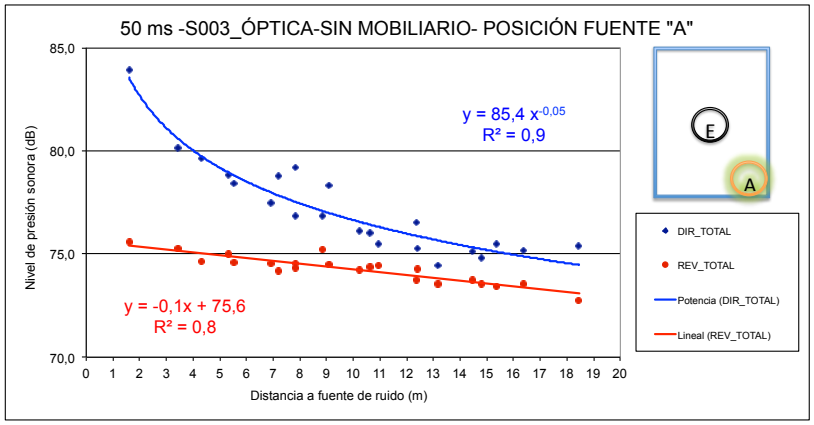
## ***Fuente en posición 'A'*** **- SIN mobiliario**

(0 - 50 ms) para el campo Útil.
(50 - ∞ ms) para el campo Perjudicial.



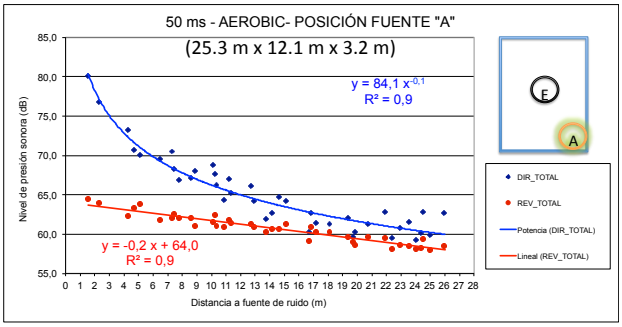




Lo más reevante de eata pareja de gráficas se tiene en la que denominamos campo Útil que sería lo correspondiente al sonido inicial. Vemos que, con respecto al campo Directo, ahora casi toda la sala menos una pequeña isla mantiane un nivel elevado y poe encima contínuamente del reverberado o campo Perjudicial que se comporta como el reverberante para el intervalo en base a 2 ms.



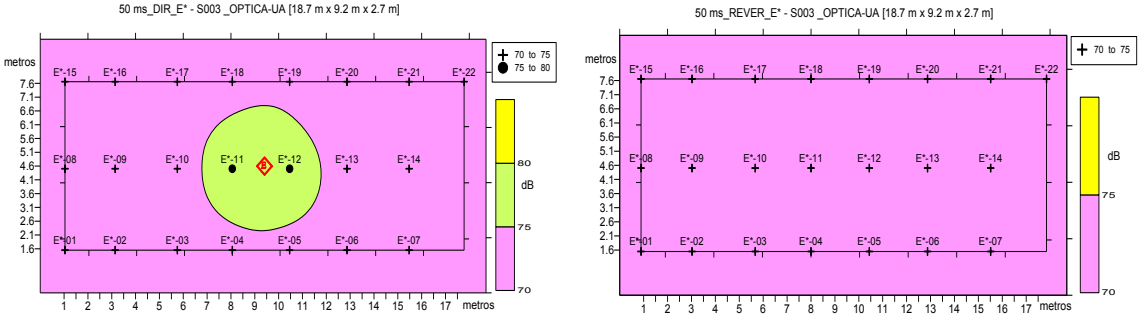

La lectura de esta gráfica nos enseña pormenorizadammente lo expresado anterior mente. Y se puede apreciar que no se puede encontrar ningún lugar en donde le campo Perjudicial compita en igualdad con el campo Útil. Por lo que es difícil determinar el radio Útil '$r_u$'. Se podría afirmar que cualquier lugar de la sala tiene sufuciente inteligibilidad.

Este hecho podría parecer puntual, pero se puede corroborar con los resultados obtenidos en otro recinto exento de muebles que también hemos estudiado pero que por razones de espacio no mostraremos extensivamente. Veamos, a la derecha, el resultado parcial que nos interesa para la sala de Aerobic del polideportivo de la Univ. de Alicante.

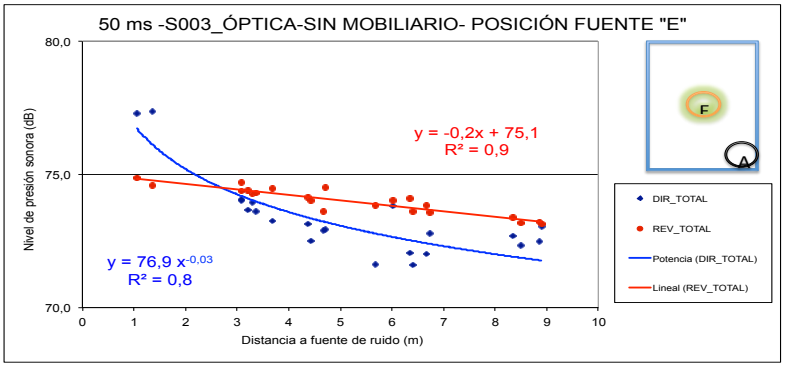


***Fuente en posición 'E'*** **- SIN mobiliario**

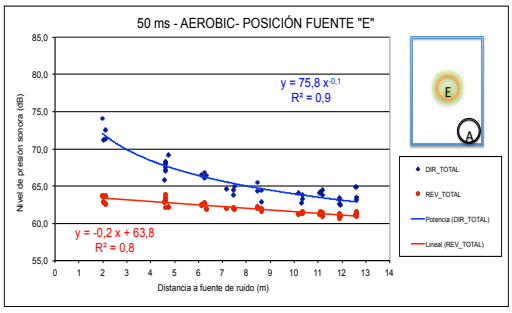
(0 - 50 ms) para el campo Útil.
(50 - ∞ ms) para el campo Perjudicial.




Los resultados obtenidos son muy curiosos pues si para la posición anterior de fuente en esquina hemos encontrado una especie de salto cualitativo importante al comparar su comportamiento con la habitación amueblada, era de esperar que ahora para la posición centrada y sin muebles ocurriera otro tanto. Pero no ha sido así, sino que justo son los dos ejemplos que más se parecen




Vemos que los campos reverberantes (Perjudiciales) son casi idénticos, en cambio aunque por la representación anterior hayamos dicho lo mismo para los campos Útiles; al fijarnos en el ajuste de la función potencial, la estimada ahora tiene un factor de 0.03 que indica que estamos ante el campo que más cerca ha estado de propagarse con un decaimiento proporcional a la inversa del cuadrado de la distancia.




Tambien es significativo que ahora si que podamos estimar un valor para el radio Útil: $r_u^{(exp.)} \approx 2.8$ m; menor que el de la situación homologa con muebles ($r_u^{(exp.)} \approx 4.5$ m). Mientras que en el caso del AEROBIC exento de muebles ocurriera lo que se muestra en la figura de la derceha.
La justificación podría estar en que: Óptica tiene 1.8 s de reverberación y el Polideportivo 1.5 s y dispone se techo acústico. La realidad se escapa del alcance de este trabajo, pero demuestra que el problema tiene una gran dependencia posicional y está ligado a las proporciones geométricas de las salas y a la distribución de los materiales de absorción.

## CONCLUSIONES

- Se ha comprobado experimentalmente que las ecuaciones que gobiernan el campo acústico (reverbernte + directo) no son del todo aplicables a la totalidad de recintos confinados.

- En este estudio experimental con medidas “in situ” se puede pensar que las dimensiones relativas (ancho, alto, largo) sobrepasan en su razón de proporcionalidad aquellas que son las óptimas para considerar que una habitación es Sabiniana.

- Las expresiones matemáticas que más se ajustan a los resultados obtenidos para el campo REVERBERANTE, lo definen como uno que decae aproximadamente de forma lineal con la distancia fuente-receptor.

- Las expresiones matemáticas que más se ajustan a los resultados obtenidos para el campo DIRECTO, lo definen como uno que decae aproximadamente de forma inversa con la distancia fuente-receptor. Pero esa relación dista de ser cuadrática.

- La directividad ‘Q’ es patente en los dos casos estudiados. Pero si los receptores estan ubicados relativamnete cerca de superficies reflectantes (mesas, cerramientos verticales, …) se evidencia que aparece una ganancia de nivel en tiempos tan cercanos a los de las reflexiones iniciales que se consideran al aplicar el factor de directividad a la fuente emisora.

- El uso del concepto de radio Crítico como un índice de referencia para la ubicación de la audiencia no tiene sentido.

- La propuesta de definición de un radio Útil nos parece más acertada. Aunque desgraciadamente no se ha podido establecer una expresión algebraica para su cálculo a priori.

- El campo sonoro dentro de un recinto tiene una dependencia muy fuerte del mobiliario cuando éste introduce un plano de reflexión casi continuo por encima del suelo propio.

- Es extraordinariamente curioso que, para el caso de fuente emitiendo desde esquina, el campo directo sea más elevado que el reverberante en cualquie punto de la habitación. (¿NO PROBLEMAS EN INTELIGIBILIDAD?)

- Nos parece que la única forma de explicar de forma coherente el fenómeno estudiado es la introducción de factores de caida exponencial dependientes de la distancia. Tal y como proponen diversos autores, ya referenciados, tanto desde una reelaboración de la teoría de propagación del campo acustico en recintos cerrados, como desde el punto de vista experimental.

**BIBLIOGRAFÍA**

[1] **Engineering Noise Control-Theory and Practice**
DAVID A.BIES & COLIN H.HANSEN
*Ed.: Spon Press, 2009.*

[2] **Occupational exposure to noise**
Ed. BERENICE GOELZER, COLIN H. HANSEN AND GUSTAV A. SEHRNDT
http://www.who.int/entity/occupational_health/publications/noise.pdf?ua=1
http://www.who.int/occupational_health/publications/occupnoise/en/

[3] **Sound Pressure Levels in Rooms: A Study of Steady State Intensity, Total Sound Level, Reverberation Distance, a New Discussion of Steady State Intensity and Other Experimental Formulae.**
HIGINI ARAU-PUCHADES
*Journal Ofbuilding Acoustics Volume 19 · N. 3 · 2012 Multi-Science Publ. Co. Ltd.*
https://arauacustica.com/files/.../pdf_esp_36.pdf

[4] **Reverberation Radius in Real Rooms.**
MIOMIR MIJIĆ AND DRAŠKO MAŠOVIC
*Telfor Journal, Vol. 2, No. 2, 2010*

[5] **Optimising sound quality for classrooms**
BRADLEY, J.S.
*NRCC-45999, Institute for Resarch in Construction*
http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# RECONSTRUÇÃO ACÚSTICA DA IGREJA SÃO MIGUEL ARCANJO DAS MISSÕES JESUÍTICAS

PACS: 43.55.Ka

Josiane Reschke Pires[1]; Maria Fernanda de Oliveira Nunes[1]; Jorge Viçoso Patrício[2]

[1] Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil - itt Performance - UNISINOS
Av. Unisinos, 950, 93022-000, São Leopoldo, Brasil, josianerp@unisinos.br ; mariaon@unisinos.br

[2] Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, jpatricio@lnec.pt

## ABSTRACT

The “Redução de São Miguel Arcanjo” is a part of the “Sete Povos das Missões” ruins, being a strong evidence of the Jesuit missions and the European Baroque from the Iberian Peninsula, also integrated into the southern Brazil indigenous culture. In this paper, the acoustic reconstruction of “Igreja de São Miguel Arcanjo” was done. This church had the beginning of its construction in 1735 and an interruption in 1745, due to the wars between Spanish and Portuguese for territory control and possession. Within the frame of the study, a comparison was done. For that, several possibilities for positioning the choir and changes in the parameters EDT, D50, C80 and STI have been analyzed, considering the liturgical organization reported in historical records.

## RESUMO

A Redução de São Miguel Arcanjo integra um conjunto de ruínas dos Sete Povos das Missões, uma das principais marcas das missões Jesuíticas e do Barroco Europeu da Península Ibérica integrado à cultura indígena do sul do Brasil. Neste trabalho foi realizada a reconstrução acústica da igreja de São Miguel Arcanjo, a qual teve o início de sua construção em 1735 e interrupção em 1745, em função de guerras por disputa de território entre espanhóis e portugueses. Foram analisadas comparativamente diferentes hipóteses de posicionamento do coro e as respectivas alterações nos parâmetros EDT, D50, C80 e STI, considerando-se a organização litúrgica relatada em registros históricos.

## 1. INTRODUÇÃO

O programa evangelizador dos jesuítas na América do Sul incluiu a implantação de locais denominados Reduções Jesuíticas, compostos por espaços de moradias, de lazer e para o culto religioso, seguindo as tradições católicas europeias da época. A Igreja de São Miguel Arcanjo compunha uma das Reduções Jesuíticas na América do Sul, localizada no sul do Brasil, quando o território ainda era de domínio espanhol. Após diversas guerras e consequentes alterações de limites territoriais, a Redução de São Miguel passa a fazer parte do território brasileiro no início do século XIX (Figura 1) [1].

As Reduções Jesuíticas constituíam um espaço doutrinário de caráter sedentário, ou seja, aldeamentos onde os índios eram conduzidos aos bons costumes e à fé cristã. A Redução de São Miguel Arcanjo integra um conjunto de ruínas dos Sete Povos das Missões, uma das

principais marcas das Missões Jesuíticas e do barroco europeu da Península Ibérica integrado à cultura indígena do sul do Brasil.




Figura 1 – (a) Alterações nos limites do sul do Brasil; (b) Limites de cada Tratado; e (c) Localização do município de São Miguel das Missões no Rio Grande do Sul

Atualmente em ruínas, a Igreja de São Miguel Arcanjo era composta por três naves separadas entre si por uma sequência de sete arcos. O teto, em madeira, era em forma de abóbada com vigamentos aparentes, e o transepto era coberto por uma cúpula, sobre a qual existia um telhado de seis águas. Seus onze altares, um na capela-mor, quatro no cruzeiro e seis nas naves laterais, eram ornamentados com talha dourada e policromada, estatuária e pinturas (Figura 2) [2].



Figura 2 – Igreja de São Miguel das Missões: vistas externas e internas atuais das ruínas. [1]

A aldeia de São Miguel Arcanjo tornou-se ao longo dos anos a mais importante e populosa dos Sete Povos das Missões, chegando a ter quase sete mil pessoas. Contudo, atingido seu apogeu, as disputas entre Portugal, Espanha e as próprias Missões Jesuíticas, culminaram na Guerra Guaranítica, e a aldeia de São Miguel foi incendiada e despovoada em 1756 [3].

Após as guerras, a aldeia foi repovoada, e a igreja, após ter sua cobertura danificada por um incêndio, foi sumariamente restaurada, mas sem seguir os critérios de recuperação das características originais. Sendo assim, a cúpula, anteriormente de madeira, foi reerguida com tijolos e cal.

Um novo incêndio, ocasionado por um raio, ocorreu em 1789, sendo que, após a guerra ibérica por disputa de território, e a conquista da zona pelos portugueses, a igreja foi definitivamente abandonada. Outro raio a atingiu em 1886 e o telhado e a galilé desabaram [4]. Muitas das

pedras da Igreja foram removidas para serem utilizadas como material de construção e no início do século XIX a igreja foi completamente saqueada e o povoado abandonado. A recuperação das estruturas começou em 1925 e a igreja foi declarada patrimônio Mundial pela UNESCO em 1983 [3], [5].

A Igreja de São Miguel Arcanjo, obra do padre João Batista Primoli, foi traçada em estilo Barroco, com inspiração atribuída à Igreja de Gesú em Roma, e erguida em pedra arenito. Originalmente a Igreja era pintada de branco, utilizando-se a tabatinga, um barro esbranquiçado existente na região, e internamente era rica em ornamentos.

Em relação aos usos da Igreja de São Miguel Arcanjo, podem-se traçar algumas relações com os demais exemplares que correspondem ao mesmo período, pois a arquitetura da igreja cristã transformou seu layout conforme a forma e o uso do seu espaço de culto, concebido não apenas para o culto propriamente dito, mas também como lugar de memória, celebração e representação [6]. Ao longo do tempo, os templos passaram por intervenções efêmeras (tapetes, cortinas, stands, etc.), principalmente nos dois séculos do Barroco (séculos XVII e XVIII). Nestas ocasiões, a absorção sonora em igrejas e catedrais aumentou significativamente, contando ainda com a contribuição da presença de grande número de fiéis.

Desta forma, as diferenças nos tempos de reverberação (TR) são decorrentes do estilo arquitetônico da época, sendo que uma redução do TR foi constatada na época do barroco, devido ao aumento da ornamentação interna, com adornos em madeira entalhada e capelas laterais ricas em detalhes decorativos. Além desses fatores, o volume das igrejas construídas neste estilo foi reduzido, com a diminuição do pé direito e o encurtamento da nave [6]. Nessa época também ocorre uma significativa alteração da música e de gêneros musicais praticados nas igrejas, que contavam com a elevada reverberação interna para maior realismo e caráter original nos cultos.

Todas essas alterações também acarretaram variações no posicionamento da fonte sonora (uso da palavra ou cânticos), o que torna o estudo de espaços em ruínas bastante complexo. Além disso, a dificuldade em se encontrar dados específicos a respeito da forma de utilização do espaço e de algumas das suas características levaram a simplificações do processo para viabilizar estudos exploratórios.

Neste trabalho foi realizada a reconstrução acústica da Igreja de São Miguel Arcanjo, com análises comparativas de diferentes hipóteses de posicionamento do coro e as respectivas alterações nos parâmetros EDT, D50, C80 e STI, considerando-se a organização litúrgica relatada em registros históricos.

## 2. MÉTODO

O comportamento acústico do interior da Igreja de São Miguel Arcanjo foi realizado com software CATT- Acoustic v9.0c, para o cálculo de descritores acústicos, em bandas de oitava. Para a implementação do modelo 3D foram consideradas as fontes sonoras pertinentes, os receptores e a geometria da sala. As superfícies planas desse modelo foram caracterizadas por sua capacidade de absorver e dispersar a energia do som incidente, tendo como dados característicos os coeficientes de absorção e de espalhamento.

O coeficiente de espalhamento é dominante nas altas frequências, exceto para superfícies maiores que 10 m de extensão. Segundo Vorländer, detalhes com dimensões inferiores a 0,5 m são mais relevantes para estudos que incluem faixas de frequência com comprimento de onda de até 5 cm. Desta forma, as razões para se escolher uma faixa de frequências mais baixa seriam o conteúdo espectral predominante de fontes naturais acima de 7 kHz. [7]

Os coeficientes de espalhamento são definidos a partir de uma relação entre a área e a rugosidade da superfície exposta. Como um procedimento comum na simulação das catedrais, para as superfícies lisas e pouco decoradas, são atribuídos coeficientes de espalhamento que variam de 0,12, na banda de 125 Hz, até 0,17, na banda 4000 Hz, que incluem um aumento linear de 0,01. Para as superfícies decorativas são atribuídos coeficientes mais elevados, que variam linearmente de 0,20, na banda de 125 Hz, a 0,40, na banda de 4000 Hz. Para demais elementos como, por exemplo, grandes esculturas e abóbadas são atribuídos valores entre 0,30, na banda de 125 Hz, até 0,80, na banda de 4000 Hz. [7], [8]

Conforme mencionado anteriormente, a Igreja de São Miguel da Missões passou por significativas alterações em seu interior. Para este estudo, foram adotadas as considerações registradas por Meira [3], Machado [5] e Rodrigues [4], que indicam que, antes da missa, as crianças cantavam no átrio em filas separadas por gênero, e depois entravam na igreja pelas portas principais. A nave central era ocupada pelas autoridades civis e atrás ficavam os rapazes e, aproximadamente dois metros atrás tanto na nave central com nas naves laterais, postavam-se as mulheres.

Desta forma, os locais de posicionamento do coro considerados foram: no altar como um coro de orações, no altar como um coral, no mezanino e no átrio na porta de entrada principal, conforme a seguir.

- Organização litúrgica A: posicionamento do sacerdote e demais assistentes no altar principal durante a missa em atividade de fala.
- Organização litúrgica B: posicionamento do coral no altar principal em atividade de canto.
- Organização litúrgica C: posicionamento do coral no mezanino acima da entrada.
- Organização litúrgica D: posicionamento das crianças no átrio em filas.

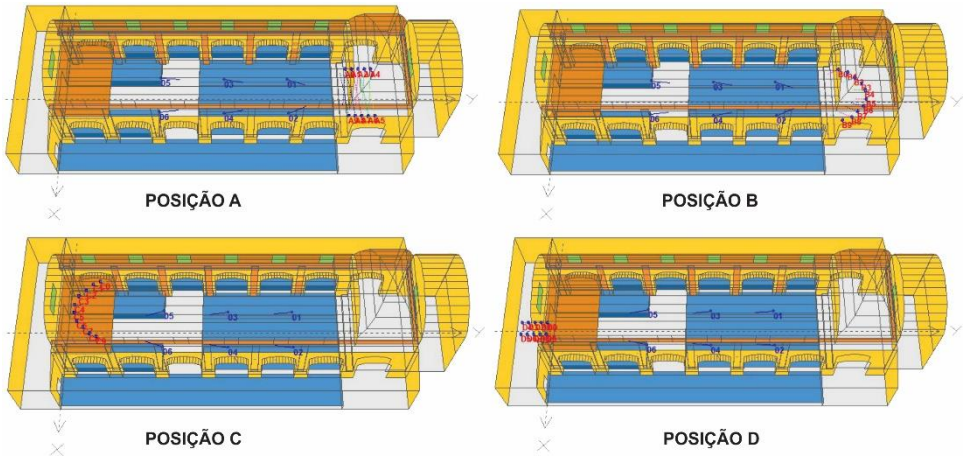



Figura 3 – Modelo 3D utilizado na simulação dos parâmetros sonoros na Igreja de São Miguel Arcanjo com as diferentes posições do coro.

Os coeficientes de absorção "*α*" e de espalhamento "*s*" utilizados neste estudo são expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de absorção *α* e de espalhamento *s,* por banda de frequências, utilizados no estudo.

| Material | Coeficientes | Bandas de frequência (Hz) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Audiência superfície superior | α | 50 | 60 | 70 | 80 | 80 | 80 |
| | s | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| Audiência superfície lateral | α | 50 | 60 | 70 | 80 | 80 | 80 |
| | s | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| Madeira da cobertura | α | 18 | 12 | 10 | 8 | 7 | 7 |
| | s | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Argamassa nas superfícies > 10 m | α | 6 | 6 | 6 | 8 | 9 | 10 |
| | s | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Argamassa nas superfícies < 10 m | α | 6 | 6 | 6 | 8 | 9 | 10 |
| | s | 20 | 24 | 26 | 32 | 36 | 40 |
| Madeira das janelas | α | 20 | 15 | 10 | 8 | 7 | 7 |
| | s | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Argamassa do piso | α | 1 | 3 | 5 | 2 | 2 | 2 |
| | s | 12 | 26 | 39 | 53 | 66 | 80 |

As alturas definidas para este estudo foram de 1,20 m para os ouvintes, 1,70 m para os emissores adultos e 1,0 m para os emissores infantis.

## 3. RESULTADOS

As Figuras 4 e 5 apresentam o mapeamento dos parâmetros C80 e STI a 1 kHz para as quatro posições do coro. O parâmetro C80, que caracteriza os espaços com atividades musicais, apresentou faixas amplas de variação com valores entre 9 dB e -9 dB para o posicionamento das fontes sonoras na porta de entrada principal e de 5 dB a -6 dB para o posicionamento do coro no mezanino, também localizado na entrada da Igreja.

Em relação ao parâmetro C80, as posições com os menores valores positivos, correspondem a uma distribuição decorrente da emissão sonora na direção do eixo longitudinal da Igreja de São Miguel Arcanjo. Nas áreas com visibilidade limitada, nas naves laterais, são encontrados os menores valores de C80 (Figura 4).

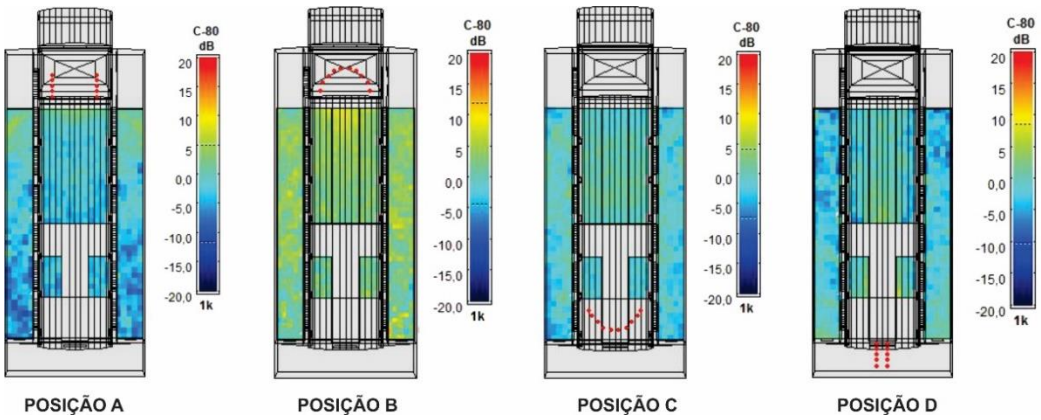



Figura 4 – Simulação de C80 a 1 kHz para as quatro posições do coro.

O índice STI, que caracteriza a percepção da palavra e indica se um determinado som será entendido com o mínimo de distorção possível, também apresentou maior distinção o posicionamento do coro no mezanino. (Figura 5)

Os resultados de STI apresentaram maior relação com a influência das superfícies de reflexão e o direcionamento do som. Sendo que, com o coro localizado no mezanino, a possibilidade de distorção das informações verbais é maior. Em nenhuma das hipóteses de localização do coro o STI alcança valores que possam caracterizar uma elevada qualidade na inteligibilidade, sendo os melhores valores estimados para a posição do coro no altar principal, para as primeiras fileiras.

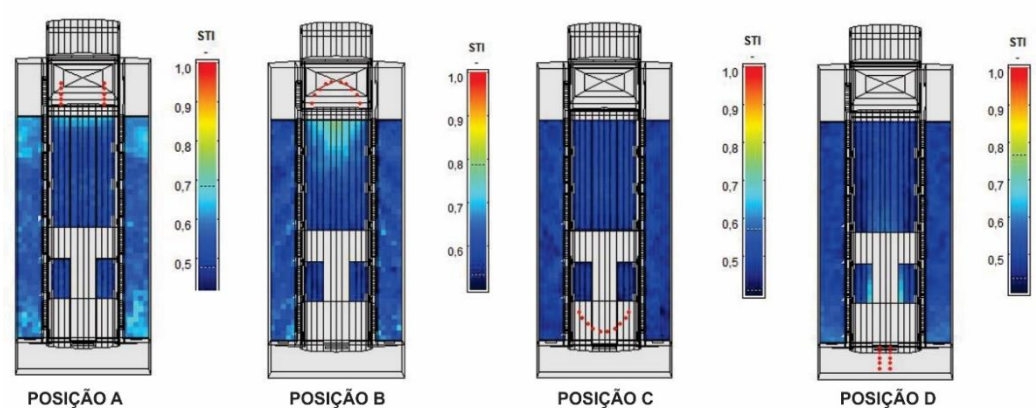



Figura 5 – Simulação de STI para as quatro posições do coro.

O parâmetro D50 é mais adequado para a localização do coro no altar principal, nas primeiras fileiras, destinadas às autoridades. No entanto, a definição sonora indicada por esse parâmetro é evidenciada nas últimas fileiras na situação de entrada das crianças. (Figura 6)

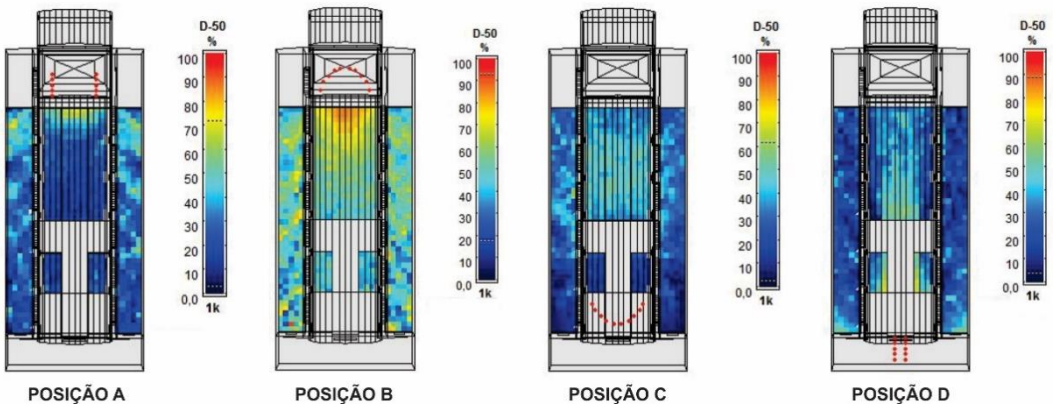



Figura 6 – Simulação de D50 a 1 kHz para as quatro posições do coro.

O parâmetro EDT tem uma forte correlação com a sensação subjetiva da reverberação e é usado como o principal descritor da reverberação em espaços litúrgicos. Nas análises na banda de frequência de 1 kHz há o aumento faixa de variação do EDT para o coro localizado no mezanino

em relação às outras hipóteses de posicionamento do coro assumidas para este estudo. (Figura 7)

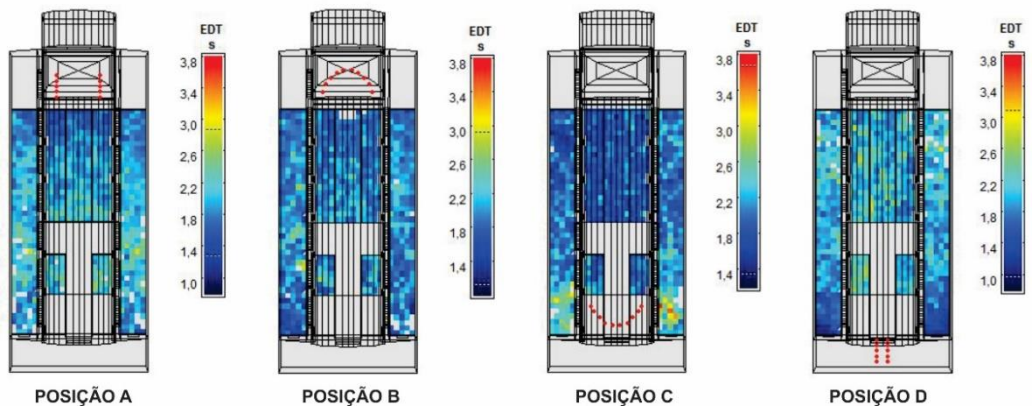



Figura 7 – Simulação de EDT a 1 kHz para as quatro posições do coro.

Comparando-se os resultados da "Posição A", o parâmetro C80 apresenta maior clareza tanto na nave central quanto nas naves laterais, próximo ao altar. Contudo, o STI, assim como o D50, é maior nas naves laterais e na área das autoridades em frente ao altar que na nave central. Nesta posição de coro, o EDT concentra-se ao final do recinto, na área ocupada pelas mulheres. A "Posição A" refere-se ao ato litúrgico, realizado em latim, e nas primeiras fileiras localizavam-se as autoridades que compreendiam o latim. A simulação indica que os valores obtidos de definição, clareza e inteligibilidade da fala são aceitáveis, mas não ideias, para o uso. Assim, como na "Posição A", a clareza do som apresenta-se uniforme na "Posição B", as naves laterais apresentam redução da clareza, quando comparadas à nave central. A "Posição B" também apresenta maior definição do som, principalmente nas primeiras fileiras de ouvintes da nave central.

Já "Posição C" é caracterizada pela fonte estar localizada no mezanino. Possivelmente, este fato esclarece os valores reduzidos de definição, clareza e inteligibilidade quando comparado as demais posições. O aumento da percepção da reverberação nesta posição pode ser considerado adequado, devido a sua importância para as atividades musicais.

O local destinado à ocupação das mulheres, espaço sobreposto pelo mezanino, apresentou melhores indicativos de qualidade acústica para a posição do coro na porta principal da Igreja (Figura 8).

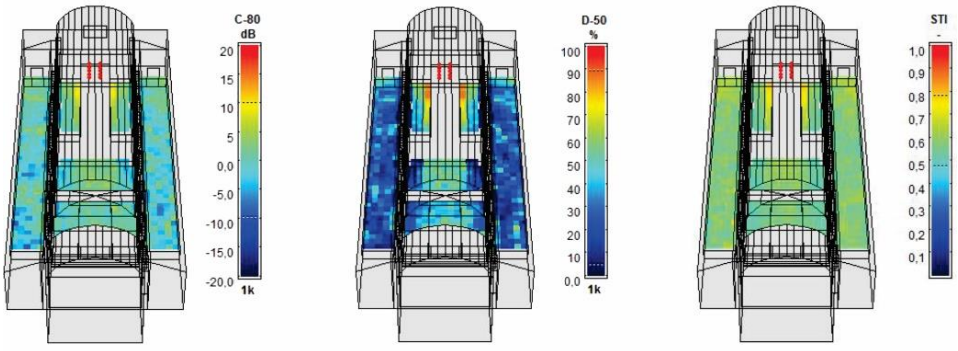



Figura 8 – Simulação dos parâmetros C80, D50 e STI para a posição da D da fonte sonora.

Nas posições de coral, clareza, inteligibilidade e definição do som são maiores quanto mais perto da fonte sonora está localizado o ouvinte. As áreas onde estariam localizadas as mulheres apresentam menor inteligibilidade do som e nos demais quesitos, clareza e definição, tanto esta área quanto a dos homens possuem valores semelhantes.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função do estado atual de ruína da Igreja de São Miguel Arcanjo, além das significativas alterações formais e nos revestimentos internos, especialmente na cobertura, as análises possíveis são realizadas com base em simulações e estimativas fundamentadas em registros históricos.

No período barroco, as necessidades acústicas da igreja cristã eram diversas às atuais necessidades. O entendimento literal da palavra era praticamente desnecessário, salvo às primeiras fileiras de ouvintes. Já a dramaticidade e teatralidade nesses recintos eram valorizadas.

A Igreja apresentava baixa inteligibilidade, clareza e definição do som falado ou musical nas áreas destinadas às mulheres e aos homens de baixa hierarquia social. Contudo, apresenta uma adequada percepção sonora nas áreas onde os ouvintes eram caracterizados por autoridades civis. O posicionamento do coro que melhor atendeu os critérios de qualidade acústica foi no altar, tanto como coro quanto como espaço litúrgico, sabendo-se que este espaço é de maior hierarquia nos cultos católicos e o mais utilizado dentro da Igreja como espaço de posicionamento de emissores sonoros.

Na análise comparativa dos parâmetros acústicos para quatro diferentes hipóteses de posicionamento do coro da Igreja de São Miguel Arcanjo ficou evidenciado que a hierarquia social utilizada para a ocupação das naves central e laterais também corresponde a diferentes níveis de percepção sonora. Nos espaços destinados às autoridades civis, na nave central próximo ao altar, os parâmetros que indicam a qualidade na comunicação verbal são melhores, pois nesses casos o coro estaria posicionado no altar principal. Para as hipóteses de posicionamento do coro mais relacionado às atividades musicais, no mezanino a na porta principal, é estimado que o local destinado às mulheres apresente maior qualidade acústica para a percepção do som.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] L. Coronel: *O Legado das Missões*. São Miguel das Missões. Prefeitura de São Miguel das Missões, 2000.
[2] L. Costa: Arquitetura dos Jesuítas no Brasil. *Rev. do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nac.*, no. 5, pp. 105–169, 1941.
[3] A. L. G. Meira: O patrimônio histórico e artístico nacional no Rio Grande do Sul no século XX: atribuição de valores e critérios de intervenção. UFRGS, 2008.
[4] P. N. Rodrigues: Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS. UFSM, 2013.
[5] J. da R. Machado: Povoado missioneiro: cenografia do Barroco a igreja o teatro e a vida. PUC RS, 2007.
[6] L. L. Henrique: *Acústica musical*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
[7] M. Vorländer: *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
[8] L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño, S. Girón, and M. Galindo: A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 102–115, 2014.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem pelo apoio financeiro:

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS; e

- Ao Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – itt PERFORMANCE da UNISINOS.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# *LAS SIETE PALABRAS DE CRISTO EN LA CRUZ* (1787) DE JOSEPH HAYDN: ENCARGO, ESCRITURA E IMPLICACIONES ACÚSTICAS EN TORNO A UNA COMPOSICIÓN ESPECÍFICAMENTE CONCEBIDA PARA EL ORATORIO DE LA SANTA CUEVA DE CÁDIZ

REFERENCIA PACs: 43.55 Br

Lda. Maria Luisa Luceño Ramos[1]
[1] Universidad Autónoma de Madrid Marisa.Luce@uam.es

**ABSTRACT**
*The Seven Words of Christ on the Cross* (1787), an oratorio commissioned to Haydn (1732-1810) for Santa Cueva de Cádiz, is music composed with the purpose of enhacing that place. There is no evidence that Haydn could have been given information about the architecture of that building, previous to the composition of music, a circumstance that, as a starting point, would not have been the guarantee of acceptable acoustic results; nevertheless, the oratorio was a complete success in XVIII century. The features of the building and its restoring (2001) enabled high acoustic features that are studied in a relationship between that place and Savall´s recording of the work in 2007, which show the achievement of the objectives of the commission.

Key words: Religious Architecture, Symphonic Music, Sound Reflection and Amplification, Restoring Buildings, Historical Recordings.

**RESUMEN**
*Las Siete Palabras de Cristo en la Cruz* (1787), oratorio encargado a Haydn (1732-1810) para la Santa Cueva de Cádiz, es una composición que perseguía realzar el valor de dicho recinto. La ausencia de evidencias de que Haydn conociese la arquitectura del edificio no anticipaba resultados acústicos aceptables, pero el oratorio en el s. XVIII tuvo un rotundo éxito. Las características constructivas y las de la restauración (2001) posibilitaron una alta calidad acústica, estudiándose la composición en relación con el recinto y con el registro de Savall (2007), que permiten corroborar la consecución de los fines perseguidos con el encargo.

Palabras clave: arquitectura religiosa, música sinfónica, reflexión y amplificación de sonido, restauración de edificios, grabaciones históricas.

**Simbiosis Musical y Arquitectónica**.- Algo especial tienen que tener tanto La Santa Cueva de Cádiz como *Las siete palabras de Cristo* de Haydn, para que Manuel de Falla en este lugar, e interpretado por él mismo en una reducción al órgano[1], sintiese clara su vocación de músico. Esa composición fue concebida para dicho recinto y escogida por su autor, como última música que dirigiría en vida y no cualquiera de las grandes obras sinfónicas que tanta fama le dieron.¿Por qué? ¿Por el sentimiento de la Pasión de Cristo, en un Haydn católico? ¿Interés por los elementos escénicos asociados a ella? ¿O por su vinculación a un espacio y a su tratamiento acústico?. Todo esto nos lleva a profundizar en esta obra a través de la versión interpretativa de Jordi Savall en este recinto: HAYDN, Joseph: *The Seven last words of Christ.* Jordi Savall, Director. Le Concert des Nations. DVD Elément Productions, 2007. (DVD Alia Vox, 2009)[2].

**Origen, encargo**: Cádiz, como gran puerto, favorece la aparición progresiva de una burguesía vinculada a los negocios, que financia la construcción en el s. XVII de diversos templos y capillas, y la restauración en el XVIII de otro, como éste: La Santa Cueva de Cádiz, ubicada en la C/ Del Rosario (coordenadas: 36º 32´01 N, 6º 17´43´´ O), que es un conjunto arquitectónico anexo a la Iglesia del Rosario de Cádiz. En un contexto ilustrado destacan Gaspar Molina, marqués de Ureña, autor de las *Reflexiones sobre la arquitectura, ornato y música del templo*..., incansable viajero que influyó con sus escritos en la difusión de los nuevos cánones estéticos, donde se unen dos conceptos, música y arquitectura, y Francisco de Paula Mª de Micón, marqués de Méritos, que menciona a Iriarte como encargado de visitar a Haydn comentándole el gusto de los españoles por

[1] Puesto posteriormente. La Santa Cueva no contaba con órgano construido en el edificio.
[2] También difundida por Mezzo, canal dedicado a la emisión de música clásica radicado en Paris, Francia.

la música, y en especial el de los reyes del momento: Carlos IV y de María Luisa de Parma. Esos datos, junto con los que menciona Haydn en sus ediciones de Artaria y Breitkopf und Härtel de cómo era la ceremonia de las Siete Palabras de Cristo con ocasión del encargo, fueron los únicos elementos con los que contó Haydn para su composición: "Hace unos quince años me fue encargada por un canónigo de Cádiz una composición de música instrumental sobre las Siete Palabras de Nuestro Salvador en la Cruz. Era costumbre en la catedral de Cádiz[3] presentar todos los años un oratorio durante la Cuaresma, el efecto de la interpretación se realzaba con estos detalles: las paredes, ventanas y columnas del templo se cubrían con cortinas negras, sólo una gran lámpara suspendida en el centro rompía aquella solemne oscuridad. Al mediodía se cerraban las puertas y comenzaba la música. Después de un preludio, el Obispo subía al púlpito, recitaba la primera palabra y hacía una alocución sobre ella; terminada ésta bajaba del púlpito y se postraba ante el altar. Durante esta pausa debía sonar la música. A continuación el Obispo pronunciaba la segunda palabra de la misma manera, después la tercera, y así sucesivamente, interviniendo la orquesta a continuación de cada alocución. Mi obra se tuvo que sujetar a estas condiciones, y no fue tarea fácil componer siete adagios seguidos de unos diez minutos de duración, y hacerlo de manera que no causara fatiga a los oyentes".

Blanco White también lo cita, así como el modo en que se llevaba a cabo la ceremonia de los disciplinantes, de arrepentimiento y autoflagelación. La recepción de esta obra iba a ser una incógnita, pero Haydn estaba acostumbrado a adaptarse estilísticamente, desde que tiempo atrás diese el salto de Austria (compuso mayoritariamente para el espacio arquitectónico de Esterhaza) a Inglaterra, donde, disponiendo de las más grandes orquestas, y recintos triunfó con sus sinfonías. Al terminarse las obras tiene lugar este encargo de 1785, y estuvo envuelto en toda una serie de contradicciones donde nada es lo que parece, pues Haydn pensó desde un principio en la Catedral de Cádiz, cuando nunca tuvo nada que ver con esto. El pago fue un pastel de chocolate[4]. Así, la génesis de la composición se asocia con una leyenda urbana transmitida por el propio Haydn, por cuyos testimonios, siempre llenos de humor, jugando al verdadero-falso, podríamos denominarlo un *gaditano de Austria*. Y aunque se titula *las Siete Palabras*… lo que se estrenó fue una versión orquestal con declamaciones, sin cantarse texto. No hay evidencias de ningún dato arquitectónico relevante aportado a Haydn, a fin de que ajustase la sonoridad de la composición al recinto. Así, el desconocimiento del compositor sobre la arquitectura del edificio no anticipaba resultados acústicos aceptables, si bien la recepción en el s. XVIII fue un éxito, hasta el punto de que esta obra desde su comienzo está ligada a ese espacio, donde se interpreta todos los Viernes Santos, y con cierta tendencia a hacerse *in situ* registros sonoros como recuperaciones historicistas comercializables. Veremos de qué modo. Además, terminada en 1786, pensado su estreno en Cádiz en el viernes santo de 1787, ya había tenido su première a en Viena en marzo de ese año ¿probando la acústica? (es una posibilidad a considerar). Resulta inaudito que se estrene en primer lugar en un sitio que no es de quien lo encarga y paga; en el siglo XVIII no había tantas limitaciones de orden legal como existen hoy en día.

**Historia y estructura del recinto**.- Este lugar está vinculado a la práctica de la Adoración de las 3 Horas, que tuvo origen en las misiones jesuíticas amercanas y fue importado a España, concretamente a Cádiz, por el jesuita Alonso Messia Bedoya, pero el deseo de intercalar música fue del ya mencionado Francisco de Paula Micón, Marqués de Méritos. En la calle del Rosario, de Cádiz, estaba la Iglesia del Rosario, del s. XVI (consagrada como parroquia en 1787). En 1730 los cofrades Disciplinantes de la Madre Antigua se reunían en una calle de mala fama. El obispo aceptó el culto pero les indicó que buscasen otro sitio. Haciendo obras en la Iglesia del Rosario, en 1756 (pues en 1755 el tsunami de Cádiz, coletazo del terremoto de Lisboa, había dañado varios edificios) se descubrió al caer accidentalmente algunas mulas de carga por una nave lateral, una la bóveda de lo que resultó ser un primer subterráneo anexo a la iglesia (el primer nivel de la Santa Cueva, el espacio que nos ocupa) lo que se vio como señal divina. Toda adoración a la Virgen para pedir protección contra terremotos era poco. Ese lugar, de planta rectangular, se habilitó y acondicionó para el culto, agrandando el recinto –importante-, y se conoce hoy en día en su conjunto como la

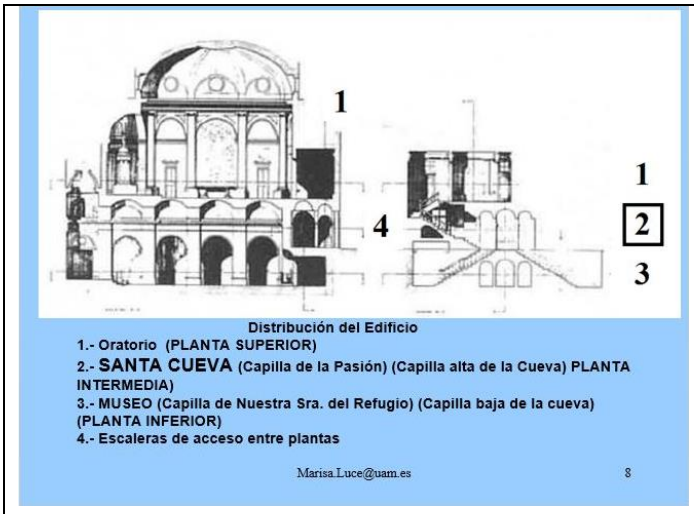
[3] En un primer momento Haydn creyó erróneamente que estaba destinada la obra para la Catedral de Cádiz.

[4] Según Haydn cuenta en la biografía de Greisinger, recibió en pago una cajita con un pastel de chocolate, que partió con rabia. Pero estaba lleno de piezas de oro, una prueba histórica del sentido del humor de los gaditanos, para un compositor austríaco que también se caracterizó por el sentido del humor en sus composiciones.

Santa Cueva de Cádiz, espacio que a su vez, puede haber sido a su vez un acondicionamiento del XVI de uno mucho más antiguo: un templo fenicio dedicado a Astarté, o un espacio subterráneo dedicado a otros fines: cueva –bodega, almacén, etc. Perteneció probablemente a ruta de templarios[5].

La cofradía tuvo un nuevo director espiritual en 1771 José Sáenz de Santamaría, clérigo jesuita, II Marqués de Valdeíñigo, y nacido en Veracruz, Méjico, que fue quien pagó la reconstrucción del conjunto y ampliación de la cueva [6]. En él se reúne el clérigo noble -perteneciente a uno de los 12 linajes históricos de Soria, los Valdeíñigo- rico e ilustrado. Además construyó sobre la Santa Cueva, a nivel de calle, un oratorio dedicado al Santísimo, en 1781. El arquitecto que termina La Santa Cueva era arquitecto militar, Benjumeda, con experiencia en reconstrucciones. El Oratorio, de planta ovalada, se revistió con los mejores materiales, y tenía cúpula sin relieves, (son trampantojos), ya adelanta no solo estética manierista sino interés acústico. Bajo la cúpula, las pseudopechinas, muestran cinco lienzos, tres de ellos de Goya: *La Santa Cena*, *La multiplicación de los panes y los peces* y *La parábola de los convidados a las bodas*. (c.1793). También hay obras de escultor granadino Manuel González, y trabajos en yeso de Cosme Velázquez: San Estanislao de Kostka y a San Luis Gonzaga, ambos devotos de la Eucaristía. No se bendice hasta 1795, así pues no puede haber actos litúrgicos, sino simplemente religiosos. Por medio de dos escaleras laterales se baja al primer lugar, a la que es propiamente Santa Cueva.

La Santa Cueva, es un edificio del XVI[7] de planta cuadrada de 14 X 14 m., con 6 pilares de base cuadrangular con aristas matadas, que dividen la sala en tres naves: la central y dos laterales La cubierta es de bóvedas vaídas y aristas laterales. Los 616 m2, lo definen como de reducidas dimensiones si pensamos en una orquesta y en feligreses. Consta a su vez de dos plantas (ver figura 1) la más profunda, la segunda, (marcada con el numero 3) ha quedado relegada a un pequeño Museo, siendo cubiertas las naves en forma de vitrinas que albergan los objetos históricos relacionados con la Santa Cueva que se exponen (y resulta impensable hoy en día que una orquesta pueda situarse allí). La Denominación de Santa Cueva, se aplica a las dos cuevas aunque el uso más frecuente es la que se asocia con la 1ª cueva, la más superficial: la capilla de la Pasión, que es objeto de nuestro estudio, la destacada con el número 2.




La restauración fue respetuosa, historicista y adecuada acústicamente.

La Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, la Fundación Caja de Madrid y la World Monuments Fund suscribieron un convenio de colaboración para la Iglesia del Rosario y la Santa Cueva de Cádiz, junto con el Ministerio de Cultura (esculturas y pinturas, etc), finalizando las intervenciones en 2001. A pesar de los deterioros del terremoto, la estructura (especialmente en su parte externa y su restauración posibilitaron una alta calidad acústica, manteniendo dimensiones, revestimientos, y supliendo la falta de piedra y ladrillo, y sellados de yeso, mármol falta de elementos como ladrillo), dejando superficies uniformes y aisladas del entorno exterior

**Fig 1:** Distribución del conjunto arquitectónico

[5] El hecho de que se utilizase una cueva parece estar en consonancia con costumbres de sociedades secretas del XVII pero la razón es otra.

[6] Jesuitas implicados en los estudios acústicos fueron: Athanasius Kirscher (*Musurgia Universalis,* 1650), y Antonio Eximeno (*Dell´origine e delle regole della música*…,1774). Los jesuitas, católicos, pertenecían a una elite intelectual, junto con el ambiente masón e ilustrado español del XVIII.

[7] El conjunto arquitectónico Oratorio (+ Cueva del Rosario o Santa Cueva) + Iglesia del Rosario (bloques vecinos, conforme a la urbanística de Cádiz en el XVIII), fue declarado Monumento Histórico-Artístico Nacional en 1981.

**La partitura**.- Otras *Siete palabras de Cristo en la Cruz* son: del s. XVI. De Orlando di Lassus, en el XVII de Henry Schutz y de Pfleger, y en el XVIII de Perlogesi y Graupner. Sin embargo lo que diferencia a Haydn de los anteriores es la naturaleza puramente instrumental de un texto nuevamente musicado La versión para orquesta, la original, tiene instrumentación está fijada por la Breitkopf und Härtel, de 1801. La letra se declama en todo caso, antes de cada movimiento. Después Haydn hizo versiones para coros y para cuarteto de cuerda, etc. Todas constan de los mismos movimientos: Introducción, siete movimientos lentos, y un tiempo final denominado Terremoto, de mayor velocidad. En la catalogación de Georg Feder: la versión a la que nos referimos se denomina *Musica instrumentale sopra le 7 ultime parole del nostro Redentore in croce ossiano 7 sonate con un'introduzione ed al fine un terremoto; Hob XX: Su instrumetnación es:* Vl, Vla, Corno I re, Corno II re, Ob I, Ob II, Fag I, Fag II, Tb I, Tb II,Basso[8]. **¿Como es la música?** Muy de Haydn: Notas tenidas largas y notas cortadas. Nivel dinámico con grandes contrastes; imitaciones motívicas; ,modulaciones; cambios de tiempo; tonalidad mayor. Percusión cuasi-militar; texturas: colchones rítmico y colchón armónico; dinámicas de contrastes y muy fuerte al final. El *terremoto* tiene ritmo marcado, cromatismos y disonancias. No había órgano en La Santa Cueva, pero hay en la composición se ve cierta emulación de la escritura organística: notas tenidas, alargadas, picadas, imitación de registraciones en las cuerdas, bajos potentes, tipo pedales. Los silencios súbitos. Es de un tenebrismo casi fuera de contexto religioso, casi es más de horror. No es exactamente una obra para la invocación al recogimiento: está más en la línea de estimular un sentimiento de dolor. Pero es el que da sentido a la funcionalidad de la composición[9]. Destaquemos el **Terremoto**: si bien existe de oficio en el Sermón de las Siete Palabras, ¿es alusión al de Cádiz, a modo de evitar uno similar?[10]). Haydn debió de tener conocimiento del de Cádiz y lo reflejó desde la discursividad de la música. El texto se basa en la cantata *Der Tod Iesu* ("La muerte de Jesús"), de 1756 (K W Ramler (*1725; †1798)[11].

**¿Cómo era la orquesta del clasicismo, de qué era capaz**? Haydn trabajaba con una orquesta de doce músicos, y de acuerdo con las tendencias del momento de la revolución orquestal de Stamitz, incluía cuerda completa, viento madera, viento metal y percusión, y tendencia a crecer en número de instrumentos normalmente incrementada en la cuerda, especialmente en la década de 1780. Los diversos orígenes de los músicos, la práctica sistemática de los ensayos y el papel central del director van creando formaciones que realcen a las más grandes y extensas formas musicales, donde la sonoridad en sí tenga buena acogida por el público, tendencia que continúa hoy en día. **¿Y dónde se colocaba la orquesta en el clasicismo?** En ocasiones en lo que podríamos denominar, en terminología del XVII, la *cazuela* de un gran salón: la parte posterior, de una sala, siendo la parte anterior el lugar donde se celebrar el evento al que la orquesta ponía música. Es el caso del estreno de *La Creación* de Haydn, en la Universidad de Viena, del cual existe iconografía y una reconstrucción historicista de lo que sonaba realmente daría resultado sería desolador: cazuela para los músicos, rodeados de ventanales y cortinajes, abundante público absorbente de sonido, y techos desproporcionadamente altos: el recinto era para ceremonias académicas, no para conciertos, en otras ocasiones, a la larga, sobre el escenario de los teatros, y en salones de baile,

---

[8] Aquí Jordi Savall interpreta la palabra bajo: pone contrabajo, amplia violonchelo e incluye un baritón. Las otras son: ***2)*** *Die sieben Worte des Erlösers* (Hob.XX/1), para cuarteto de cuerda (Hob.III:50-56), un arreglo de la versión orquestal que Joseph Haydn preparó, publicado por Artaria en 1787[8]; ***3)*** *Die sieben Worte des Erlösers* (Hob.XX/1), (reducción para teclado, un arreglo de un músico desconocido, que Joseph Haydn autorizó, publicado también por Artaria en 1787, la estudiada por Falla al órgano); ***4)*** *Die Sieben letzten Worte unseres Erlösers am Kreuze.* (Hob.XX/2), para voces solistas, coro y orquesta (compuesta en 1795-1796), con texto del maestro de capilla de Passau, Joseph Friebert, corregido por Joseph Haydn en colaboración con el barón Gottfried van Swieten.

[9] Citamos el texto original latino ya traducido: Introducción; Sonata I (Padre, perdónalos porque no saben lo que hacen: Lucas, 23,34); Sonata II (Hoy estarás conmigo en el paraíso. Lucas 23,43); Sonata III (Mujer, ahí tienes a tu hijo. Ahí tienes a tu madre (Juan 19, 26-27); Sonata IV (Dios mío, Dios mío, ¿por qué me has abandonado? (Marcos, 15, 34); Sonata V (Tengo sed. Juan 19, 28); Sonata VI (Todo está cumplido. Juan 19, 29-30), Sonata VII (Padre, a tus manos encomiendo mi espíritu- Lucas, 23, 44-46).

[10] "En ese mismo instante, la cortina del Templo se rasgó en dos partes, de arriba abajo. Además tembló la tierra y hubo rocas que se partieron. También algunos sepulcros se abrieron y fueron resucitados los cuerpos de muchos creyentes. [...] El capitán y los soldados que custodiaban a Jesús, al ver el terremoto y todo lo que estaba pasando, tuvieron mucho temor y decían: "Verdaderamente este hombre era Hijo de Dios". (Mt 27, 50-57).

[11] El significado de *palabra* tiene su acepción en sintagma en latín que se corresponde con la expresión de un enunciado. Serían los siete *mensajes* de Cristo en la Cruz.

en un palco especial cercano al techo. Hoy en día la colocación de las orquestas y la selección de recintos, ha variado mucho. Por tanto, hemos de relativizar los criterios historicistas de recuperación, ya sean iconográficos, o verbales como en este caso, aplicando lo que el sentido común le hubiera dictado a Haydn.

**La colocación de la orquesta en el XVIII en otros recintos.** En las iglesias españolas se quería una «reforma de la Música» basada en el empleo exclusivo de canto llano y polifonía contrapuntística tradicional. Un edicto episcopal de 1784 estableció «Que en las iglesias, procesiones y toda función eclesiástica no puede haber Músicas Theatrales y delicadas, ni se use de instrumentos marciales y profanos». Y por causa de la oscuridad, las mujeres deberían ocupar las naves del templo, y los hombres los coros y tribunas". Esta obra se saltaba las limitaciones impuestas por el Cabildo de la Catedral, en el uso de instrumentos, y estaba sujeta a la distribución de público en los teatros de Madrid, Barcelona y por supuesto, Cádiz. El aislar mujeres de hombres, costumbre no sólo de iglesia, sino del teatro para que no hubiese incidentes implicaría que las mujeres se perdiesen la parte escénica, filtrada por múltiples obstáculos[12] . **Qué hace Jordi Savall.-** Jordi Savall empieza prescindiendo del público, y dispone de un reciento particionado por columnas, lo que le obligaría a colocar la orquesta densamente frente al ábside, pero busca una solución intermedia: se convierte en director-oficiante discreto desde la segunda columna que separa nave central y nave lateral izquierda, renunciando a *oficiar* musicalmente desde la centralidad del recinto, quedando más en una modesta función de *predicador*, extendiendo así la orquesta en torno a él. Prescinde de la teatralidad tradicional del director y recupera una disposición clásica a lo largo de los músicos de la orquesta "a la larga", que ocupan la nave central, de un modo similar a como se situaban en ocasiones en los teatros las orquestas del s. XVIII:



**Fig 2**: Santa Cueva: ubicación de Jordi Savall y Orquesta

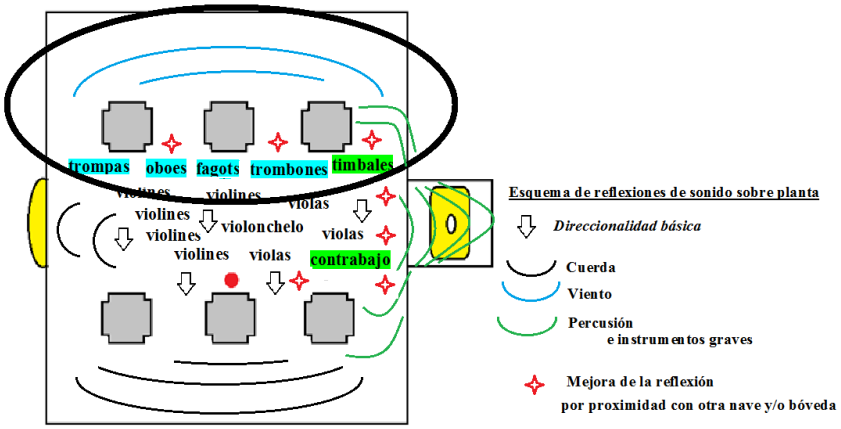
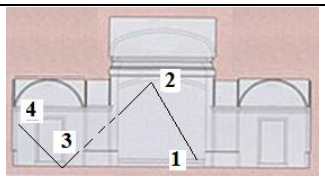



**Fig 3**: Ubicación de la orquesta: nave central
El ábside es resonador fuerte para frecuencias graves

Las capillas laterales así como el ábside, funcionan como amplificadores de graves, de bajas frecuencias, y posibilita que menos instrumentos sean más, ya que no hay mucho más espacio ni hizo Haydn indicación de más instrumentos.

La sobriedad en estructura y revestimientos posibilita la decisión acústica de Savall.

[12] Según Castro y Serrano, que escuchó la obra en 1866, habla inequívocamente de cuarteto: «se derraman las notas tenues de los CUATRO INSTRUMENTOS […], la imponente ira de aquel cuarteto desbordado»; y precisa de manera inequívoca que los músicos tocaban no en las naves de la capilla, sino en una tribuna o galería que se extiende a lo largo y por encima de la nave de la derecha y que comunica con el testero de la capilla a través de dos ventanales: Concluida la explicación de la palabra, […] se enlaza el ECO de la última sílaba con el primer acorde de uno de los siete andantes musicales; y esta transición, tanto más inesperada cuanto que la melodía baja del cielo, suspende el ánimo del auditor, impidiendo todo género de curiosidad". Según la tradición Castro y Serrano nos dice que realmente se tocaba en la segunda cueva que hoy en día es un museo, impracticable como espacio de concierto: diminuto espacio con pequeñas galerías por vitrinas de cristal, y además para cuarteto, con lo cual prescindimos de esta 2ª cueva. Las mayúsculas son nuestras.



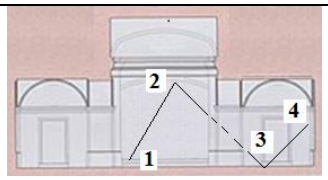


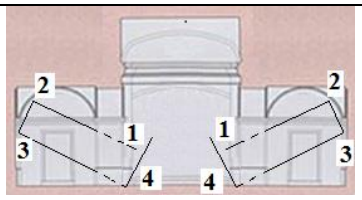

**Fig. 4** Reflexión a la nave izquierda / Reflexión a la nave derecha
Sonido que parte de la **nave central** hacia las naves laterales (ubicación del grueso de la orquesta)

El espacio destinado a la orquesta, el que realmente resuena porque

Las columnas, cubiertas de cortinajes lo delimitan y aíslan del resto, y funcionan como absorbentes de sonido.

**Fig, 5**

Sonido que parte de las **naves laterales** (instrumentos específicamente situados cerca de las naves laterales en especial el viento y la percusión).




**Captura de la grabación**.- Jordi Savall aborda un difícil proyecto: registra la obra en una producción de video, y la comercializa, junto a Le Concert des Nations, su orquesta. No es un playback puesto que los gestos variados de dirección, coordinados con primeros planos de intérpretes, permiten percibir mejor el sonido de solistas, conforme a las convenciones del cine, y nos permiten hablar de una grabación que parece toda seguida, aunque no lo es; el análisis de espectro presenta explicaciones plausibles sobre la toma de sonido, y también sobre la calidad acústica del recinto: descargado el registro a mp4 en alta definición, transformado a WAV., y procesado por Audacity 2.06 descubrimos por análisis de espectro general, que se toma mediante al menos dos micrófonos suspendidos multidireccionales una grabación en estéreo (puesto que el espectro de grabación no es exactamente el mismo en pista derecha que en izquierda, y el rango dinámico abarca sonoridades entre los 4 db y los 30 db; Por análisis de *beats:* los numerosos cortes o *takes* en la pista de sonido son de tomas distintas al cambio de movimiento: es un registro de señal editado, prescindiendo de pasajes que no resultasen adecuados acústicamente, y sustituyéndolos. En cuanto al análisis de silencios, hay ausencia de reverberación continua, la explicación de la sala seca, lo que evita que por reverberación haya armonías indeseadas tendentes a la disonancia. Es decir, es una sala adecuada para el registro musical de obras del Clasicismo.

**PRINCIPIOS ACÚSTICOS: Dimensiones**.- El sonido surge en la nave central, que es donde se aplicaría realmente la relación de proporcionalidad con la onda sonora de Bolt.

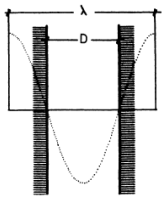



**Fig. 6**
**(Autor: Francesc Daumal )**

**Forma.** El paralelepípedo, está relacionado con los acordes musicales (tres primeras frecuencias propias o estacionarias del local), según la tratadistica arquitectónica. La relación entre la distancia D y la longitud de onda Lambda de la primera estacionaria (la más grave), aparece cuando esta longitud es igual al duplo de la distancia existente entre ambos paneles. Para la onda sonora, Bolt define ya el punto central del área con un prisma unitario de proporciones: 3 m de altura, en una sala de 4,98 m por 3,99 m de planta en primer caso Las proporciones en la Sala de la Pasión de la Santa Cueva de Cádiz se aproximan pues son de 5 m. de altura en una sala de 12 m de largo x 5 metros de ancho,superficie utilizada por los músicos y ampliada a las naves laterales según la forma descrita.

Esta proporción vaticina una excelente reflexión dada la poca absorción, si bien hay una disparidad que se da con el textil y con el ser humano. **Los fenómenos acústicos que aparecen son**: 1).- Transmisión de sonido (desde la parte baja de la nave central hacia lo alto, y para instrumentos colocados estratégicamente (instrumentos de viento y percusión), y de transmisión de sonido a una nave lateral que funciona como resonador, y para otros (percusión y contrabajo) incluso transmisión al espacio del ábside que también funciona como resonador; 2).- Reflexión: en espacios lisos (paredes o techos) o cóncavos (bóvedas); 3).- Amplificación en el caso de la reflexión concatenada de sonido de instrumentos con partida de la nave central, llegada a lave lateral y vuelta a la nave central. La reflexión y amplificación se limitan: existencia de columnas recubiertas de textil: no

producen interferencias por reflexiones complejas, dando lugar a reverberaciones: funcionan a modo de sombras acústicas. Además el grupo escultórico del ábside interfiere en reflexiones completas procedentes de los instrumentos graves mencionados. 4).- Absorción. Es un espacio a tener en consideración para el presente estudio. Serán de aplicación para cálculos las fórmulas:

| | |
|---|---|
| T= 0´161 V/ A<br><br>(V es el volumen del local, en m3; A= la suma de las absorciones de cada una de las superficies del local, absorción total; A= S1, + S2, + S3, … + Sn; (T= tiempo de reverberación en segundos) | Formula de Millington-Settle: para superficies de distintos materiales, hay distintos coeficientes de absorción:<br>$T = \frac{0.161\ V}{S\,[-S\ \mathrm{Ln}\ (1-a)]}$ |

También serían de aplicación las siguientes fórmulas para determinar con más precisión el alcance de las reverberaciones que se dan en estos espacios diferenciados:

| | |
|---|---|
| …de Eyring-Norris:<br>$T = \frac{0.161\ V}{-S\ \mathrm{Ln}\ (1-a)}$<br>(a: es coeficiente de absorción media) | …y también la de Millington-Settle :para superficies de distintos materiales, distintos coeficientes:<br>$T = \frac{0.161\ V}{S\,[-S\ \mathrm{Ln}\ (1-a)]}$ |

Se contemplan varios coeficientes de absorción no sólo para un determinado material o elemento sino según la frecuencia, lo que evidencia el irregular comportamiento del sonido en su longitud de onda y las consecuencias acústicas a la hora de efectuar una grabación en un recinto de estas características. Revestimientos: techos de piedra o piedra + mortero de yeso. Suelo: de taracea de mármol. Columnas: de piedra. Paredes correspondientes al lateral de las naves laterales revestidas de mortero de yeso. Estos revestimientos dan medida de las diferencias que se deben dar de reverberación, a través de los distintos índices de absorción de los materiales:

| **Material** | 128 Hz | 256 Hz | 512 Hz | 1024 Hz | 2048 Hz | 4096 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| piedra | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| revocado de yeso sobre pared | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| mármol | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| fieltro (cortinajes de 50 mm. | 0´15 | 0,33 | 0,61 | 0.84 | 0.75 | 0.70 |
| músico con instrumento | 0.40 | 0.85 | 1.15 | 1.40 | 1.20 | 1.20 |

Parece ser una sala seca, sin reverberaciones. Además las escaleras de acceso no pueden proporcionarlas ya que disponen de puertas. Así, la presencia múltiple de músicos + instrumentos favorece la discriminación tímbrica de los diferentes grupos instrumentales. Las cortinas, muy plegadas rodean exclusivamente las columnas, que induce a pensar que suelen cubrir la distancia entre columna y columna aislando las naves. Savall acondiciona, modificando su uso: cubre cada columna, que queda como absorbente, dejando que el sonido se refleje en las naves laterales, que funcionan como resonadores. La idea del recubrimiento textil tiene una base más acústica que religiosa de recogimiento en la oscuridad, probablemente surge desde el diseño de la ceremonia con Valdeíñigo, y en todo caso la adopción parcial del cortinaje beneficia acústicamente. Savall hace una reinterpretación de lo que debió de ocurrir históricamente, mejorando los problemas acústicos que debieron darse, como solución más vinculada al compositor Haydn (tocar en gran orquesta en gran recinto) pues parece haber una tradición de cubrir toda la nave central con tela, lo cual sería excesivamente absorbente aislando excesivamente tanto espacial como acústicamente la nave central, y dejando la sala muy seca. No estamos, desde luego: 1).- Ni en un auditorio específico como recinto específicamente concebido para conciertos. 2).-Tampoco estamos en un estudio de grabación donde al menos se intenta controlar todo o del sonido. Estamos en un escenario en el que tenemos una obra que se compuso sin conocer el recinto, que, a su vez, dado el ritual de las Siete Palabras, imponía condicionantes acústicos importantes.

**CONCLUSIONES**.- La consolidación del edificio por la restauración lo aleja de cómo debió sonar en realidad, en paredes más porosas probablemente, debido al terremoto/ tsunami de Cádiz que afectó a todos los edificios. Probablemente el sonido se salía por todos sitios aún con la restauración de Valdeiñigo. Caja Madrid mejora ostensiblemente la estructura, solados y revestimientos para una adecuada reflexión del sonido. Una obra para el culto religioso que termina siendo obra de repertorio y que muy probablemente posibilitó la restauración arquitectónica demandando unos estándares adecuados tras toda una historia de intervenciones.

Jordi Savall se atreve en 2007, (comienzo del terremoto económico español), a abordar esta obra, y opta por la Santa Cueva en su espacio superior renunciando a colocarse o en una nave lateral o al final de las tres, convierte a la sala en más seca que resonante, reubicando las cortinas, evitando reverberaciones, que produjesen disonancias indeseadas. Ante la falta de más datos que los que aporta Haydn, y las limitaciones del recinto, hace una recuperación historicísticamente libre de lo que plausiblemente es factible, haciendo arqueología sonora, donde no todo se puede recuperar y sólo tenemos indicios, pero con un resultado no sólo aceptable sino muy bueno, a través de la vía de la reinterpretación, aprovechando estratégicamente al máximo el entorno de resonadores, absorbentes, reubicando la orquesta con la finalidad de reforzar graves, y acercarse lo más posible a Haydn, plasmando los rasgos del clasicismo en su esplendor vienés. Evita el uso de la palabra, que evidenciaría la existencia de ecos.

El pensamiento generador de este espacio en la recuperación de 1771 de Valdeíñigo no es sólo místico, sino científico-lúdico. En el contexto de una teológica católica propiamente dicha, hay una estética ilustrada, adicional: la acústica lo delata: cálculo de las dimensiones del espacio con un impacto en la reflexión de sonido, en una obra religiosa rompedora, no solo de transmisión de las pasiones como oratorio, celebración no litúrgica, sino que incluye elementos literarios, escénicos, cercana más bien a las comedias de magia, y que permiten por tanto una aproximación más profana desde el cuidado prestado debidamente a la acústica. En esa capilla no había órgano, tampoco lo había en el oratorio, pero parece estar preparada para la presencia de una orquesta del clasicismo, pero en presencia de una orquesta. *Las Siete Palabras de Cristo en la Cruz* de Haydn, pues, está en simbiosis con el recinto del espacio superior de la Santa Cueva de Cádiz, con lo cual Jordi Savall posibilita desde este registro que Joseph Haydn alcanzase los objetivos marcados por el encargo, pues si bien la versión es solo orquestal. Dado que San Agustín cita en uno de sus escritos “Quien canta, reza dos veces” (Sermón 34,1): al eliminarse el texto, Jordi Savall permite todavía que se le de esplendor en nombre de Haydn rezando una.

## BIBLIOGRAFÍA.

ALONSO de la SIERRA FERNÁNDEZ, Juan y Lorenzo: “Trabajos en yeso de Cosme Velázquez y su círculo para el Oratorio de la Santa Cueva”. En: *PH Boletín 33,* p. 76-86;

CALVO-MANZANO, Antonio: *Acústica Fisico-Musical*. Madrid: Real Musical,1991;

DAUMAL i DOMÈNECH, Francesc: *Arquitectura acústica. Poética y diseño*. Barcelona: Edicions UPC, 2002;

DÍEZ MARTINEZ, Marcelino: “Las Siete palabras de Cristo en la Cruz de Franz Joseph Haydn: Un caso paradigmático de mecenazgo musical de la nobleza”. En: *Revista de Musicología* XXVI, 2, 2003, pp. 491-512;

DOLAN, Emily I: *The Orchestral Revolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013; “Iglesia del Rosario y Santa Cueva de Cádiz”. En:
http:// multimedia/fundacionmontemadrid/patrimonio/santacueva. Captura de 27 de Julio de 2015.

JIMÉNEZ MATA, Juan y MALO de MOLINA, Julián: *Guía de Arquitectura de Cádiz. Cádiz*, 2 vols. Junta de Andalucía, 1995.

PINILLOS y LAFUENTE, Luis: “El Oratorio de la Santa Cueva de Cádiz, El Marquesado de Valdeíñigo y el Solar de Valdeosera”. En: *Doce Linajes de Soria*. En:
http://www.docelinajes.org/2013/05/el-oratorio-de-la-santa-cueva-de-Cádiz-el-marquesado-de-valde-inigo-y-el-solar-de-valdeosera/ Consultado el 27 de Julio de 2015.

Gráficos: M. L. Luceño, excepto Figura 6 (F. Daumal)

Agradecemos al Dr. Francesc Daumal i Domènech la revisión de este artículo.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

# SUBESTRUCTURACIÓN EN RECINTOS

# MÉTODO SIMPLE

**PACS**: 43.55.Gx

F.X.Magrans; Ingenieria para el Control del Ruido fxmagrans@icrsl.com.

## ABSTRACT

A method is proposed to, partitioning a room in smaller parts, calculate the response of the whole room to any number of sources excitation if we know the response of each part. As a consequence the method allows to extend the frequency range of calculus using only matrices of smaller dimensión than the whole matrix and also allows to reduce the time of calculus if we select parts of the room with same dimensions. The room may have absorption with local reaction placed on the walls and with a known impedance.

## RESUMEN

Se propone un método para calcular la respuesta de un local dividiéndolo en trozos y resolviéndolos por separado. Esto permite extender el rango de frecuencias ya que se trabaja con matrices de dimensión mucho menor reduciendo el tiempo de cálculo, también porque permite reducir la memoria necesaria para realizar el cálculo y, finalmente, porqué si en el recinto se seleccionan trozos de las mismas dimensiones un solo cálculo nos permite representar matemáticamente todos los trozos de iguales dimensiones.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro de la aportación de ICR en el proyecto “ Acústica Virtual aplicada al Patrimonio cultural” financiado por el Ministerio de Educación bajo el código BIA2012-36896.

El objetivo de ICR en este proyecto es colaborar en los métodos para el estudio de la transmisión sonora en recintos para medias y bajas frecuencias, desarrollando modelos numéricos que permitan resolver el problema de acoplamiento de espacios, problema particularmente difícil en recintos complejos y de grandes dimensiones como muchos de los que figuran en este proyecto. Esto equivale a desarrollar métodos de cálculo que permitan resolver numéricamente las presiones que un conjunto de fuentes sonoras producirán en un recinto obviando las limitaciones de memoria y del tiempo de cálculo.

Para conocer las presiones producidas por un conjunto de fuentes sonoras en un recinto teniendo en cuenta el modulo y la fase de las presiones generadas y de la respuesta en el local puede recurrirse en el espacio de tiempo a resolver la ecuación de Onda o en el de frecuencia a resolver la Ecuación de Helmholtz. La solución de esta ecuación expresa las presiones acústicas en un recinto en función de la frecuencia, de las características del recinto y de las características de las fuentes sonoras.

Un método para resolver la ecuación de Helmholtz es el de las diferencias finitas que puede expresarse como un sistema algebraico que contiene las presiones en todo el recinto y las impedancias normales en el contorno. La inclusión de la impedancia en los límites permite resolver problemas de recintos con materiales absorbentes en sus cerramientos o con paredes que separen el recinto estudiado de otros recintos. Así pues permiten estudiar el problema en toda su dimensión sin otra limitación que la que, en frecuencia, introduzca la discretización del recinto. Esto definirá una frecuencia máxima hasta la que el cálculo tendrá precisión suficiente.

La resolución mediante discretización siempre se enfrenta al problema de la elevada dimensión de las matrices puestas en juego. Sus grandes dimensiones limitan la capacidad de cálculo tanto por el tiempo necesario para resolverlo como por la memoria que debe utilizarse.

En el presente trabajo se propone acudir a métodos de subestructuración. Subestructurar supone dividir el problema de un recinto en varios recintos menores con ciertas condiciones de contorno, resolver estos problemas de dimensión menor utilizando un tiempo de cálculo y dimensión de memoria mucho menores y luego “coserlos” para hallar la solución del recinto entero.

## ANTECEDENTES

Sin pretender hacer una revisión a fondo de los métodos existentes diremos que los trabajos destinados a la consecución de esta solución por partes a la que llamamos Subestructración son múltiples y empiezan en 1964 con el trabajo “On the Dynamic Analisys of Structural Systems using component modes” AIAA paper Num.64-487 First AIAA meeting June 1964. Posteriormente y en el mismo sector industrial (la aeronáutica) Craig y Bampton se basaron en

el anterior trabajo para desarrollar una metodología más amplia. “Coupling of substructures for dynamic analisys” AIAA journal Vol. 6 Num. 7 July 1968.

Estos métodos ya son ampliamente utilizados y se desarrollan actualmente soluciones iterativas de mayor calado teórico siendo un ejemplo del año 2000 el trabajo de Farhat y otros. “Two level domain decomposition methods with Lagrange multipliers for the fast iterative solution of acoustic scatering problems” Charbel Farhat et al.

Frecuentemente la subestructuración se utiliza para separar problemas de distinta naturaleza, por ejemplo estructuras acopladas a un fluido  o bien materiales porosos absorbentes acústicos con un modelo propio y el recinto que los contiene que responde a la ecuación de Onda.

También es cierto que se utiliza para reducir la dimensión de un problema por ejemplo en el ámbito naval donde se pretenden los dos aspectos, reducción de la dimensión y separación de las ecuaciones de distinta naturaleza.

Se utiliza también, finalmente, en las estructuras complejas para estudiar cuales son los subsistemas SEA que lo componen.

## SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta y desarrollada en este trabajo se inspira en los métodos utilizados en acústica para calcular redes de tuberías y aun siendo un esquema más simple permite resolver los problemas relacionados con recintos en su aspecto más general. En su modo más elemental dichos métodos suponen que sólo se propagan ondas planas y basándose en este hecho establecen una relación matricial entre presión y velocidad en la entrada y los mismos parámetros en la salida.

Una mejora aparece inmediatamente si consideramos que podemos obtener una matriz que relacione las presiones en todos los nodos y sus 3 velocidades. Dicha matriz es la matriz que tiene como columnas las presiones en todo el recinto provocadas por fuentes de velocidad $v_x$, $v_y$, $v_z$ en todos y cada uno de los nodos y puede obtenerse sencillamente mediante la inversa de la matriz definida por las ecuaciones en DF. Si finalmente sólo guardamos una matriz que relacione $p$,$v_n$ (velocidad normal) en la entrada y la salida dispondremos del mismo esquema que en las redes de tuberías sin recurrir a la hipótesis de las ondas planas y podremos encadenar dichas matrices en los distintos recintos para calcular el comportamiento del conjunto. Esto supone una reducción notabilísima de la memoria necesaria en tanto que no se conserva la información correspondiente al interior del elemento.

El siguiente paso lógico es intentar generalizar el proceso en especial excluyendo el concepto de entrada y salida para hablar sencillamente de recintos. Este es el esquema que se desarrolla en el presente trabajo.

## DESARROLLO DE LAS ECUACIONES

En primer lugar se secciona el volumen en volúmenes menores.

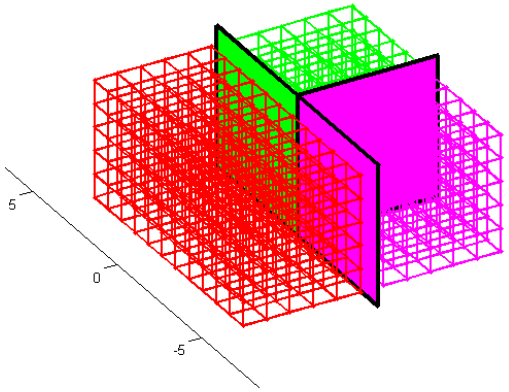



Figura 1- Recinto seccionado en tres volúmenes menores incluyendo sus respectivos mallados.

Para cada bloque se busca la matriz que relaciona presión y velocidad en todos los grados de libertad en condiciones de bloqueo en su frontera. Para ello si L(p,v)=0 (p=presión, v=velocidad) es la ecuación de Helmholtz discretizada se buscaran sus soluciones para v=I (matriz identidad) . Dicha soluciones forman la matriz R de respuestas al impulso de todos los grados de libertad. Dicha matriz R se reducirá a otra $R_C$ que sólo incluye los grados de libertad de las caras del bloque. La nueva matriz $R_C$ con dimensión igual al número de grados de libertad de las caras será la que relacione las presiones con las velocidades en las caras.

Utilicemos para cada bloque la matriz que obtiene sus presiones conociendo sus velocidades.

Sea A la cara común a dos bloques. En la cara A las velocidades han de estar relacionadas con las presiones a ambos lados de dicha cara, sean las otras caras C y D y $p_i$ y $p_t$ las presiones en ambos lados de la cara común. Sean además $a_{mn}$ y $a'_{mn}$ los coeficientes de la matriz $R_c$ correspondiente a cada uno de los volúmenes. Podemos ahora establecer la siguiente ecuación de continuidad para todas las caras comunes.

$$p_i - p_t = \sum_{j\in A} a_{ij} v_j + \sum_{k\in C} a_{ik} v_k - \sum_{l\in A} a'_{tl}\, v_l - \sum_{s\in D} a'_{ts}\, v_s = i\omega\rho v_p \Rightarrow$$

$$\sum_{j\in A} (a_{ij} - a'_{ij} - i\omega\rho\delta_{jp}) v_j + \sum_{k\in C} a_{ik} v_k - \sum_{k\in C'} a'_{ts}\, v_s = 0 \qquad (1)$$

En donde, como ya se ha dicho, los coeficientes son los de las matrices $R_c$ de respuesta al impulso.

La ecuación (1) nos dice que en la matriz total la posición ij de la cara común deberá ser $a_{ij}$-$a'_{ij}$ y el término independiente será cero desapareciendo de las ecuaciones las velocidades de la cara A.

Después de unir todos los macrobloques quedaran como incógnitas las velocidades en las caras de unión de los bloques y las velocidades en las paredes exteriores. Pero para cada elemento de las caras exteriores podremos también escribir una ecuación extraída de la matriz $R_c$

correspondiente relacionando la presión en aquel grado de libertad con las velocidades en los restantes grados de libertad del recinto.

$$p_i = \sum_{i,j\in C} a_{ij} v_j \Rightarrow v_i = \sum_{i,j\in C} \frac{a_{ij}}{Z_i} v_j \Rightarrow \boxed{0 = \sum_{\substack{i,j\in C \\ j\neq i}} \frac{a_{ij}}{Z_i} v_j + \left(\frac{a_{ii}}{Z_i} - 1\right) v_i} \quad (2)$$

Así pues obtendremos un conjunto de ecuaciones que tendrán como incógnitas las velocidades sobe las superficies separadoras de los bloques y sobre los elementos exteriores y que formarán un sistema de ecuaciones homogénea ya que todas estas ecuaciones son iguales a cero.

Para que esto tenga solución será necesario que sobre la superficie o sobre un contorno que contenga una fuente exista un elemento  o más que tengan velocidad distinta de cero.

Estos elementos pasarán a ser el término independiente del sistema de ecuaciones cuya solución nos darán las velocidades sobre las caras separadoras y sobre las superficies exteriores.

Es decir disponemos de un sistema de ecuaciones donde el primer bloque de filas son las fuentes. El segundo bloque son las ecuaciones de continuidad y el tercer bloque son las ecuaciones derivadas de  la impedancia en las paredes exteriores.

$$\boxed{\begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ \overline{A}_s & \overline{A}_C & \overline{A}_i \\ \overline{B}_s & \overline{B}_C & \overline{B}_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{v}_s \\ \overline{v}_C \\ \overline{v}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{b} \\ \overline{0} \\ \overline{0} \end{pmatrix}} \quad (3)$$

Estas ecuaciones nos permiten obtener como solución las velocidades en las caras interiores y exteriores.

Finalmente conociendo las velocidades en las caras de los bloques y a través de las matrices R podemos calcular las presiones en todas las celdas con lo que el problema queda resuelto.

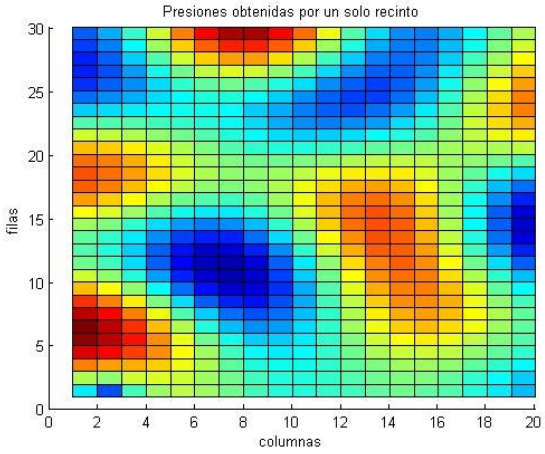
## RESULTADOS

Las pruebas se han hecho con un recinto en dos dimensiones dejando para más adelante la implementación a tres dimensiones.

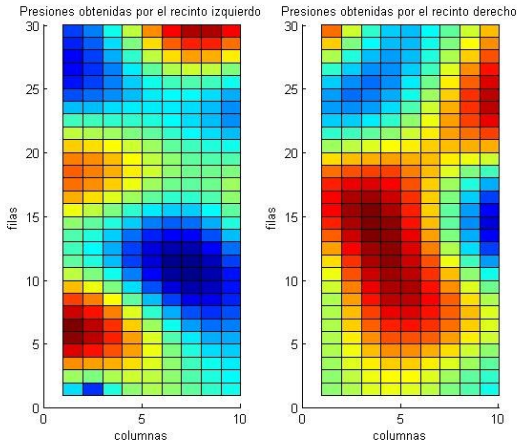
### 1.1. PRUEBAS EN 2D

Las pruebas realizadas no lo han sido sobre matrices de grandes dimensiones, que es donde el método de subestructuración consigue ventaja evidente. Las pruebas  realizadas sólo persiguen probar la validez del método.

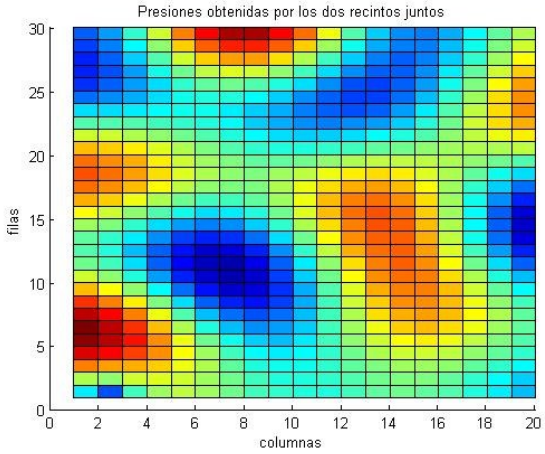
El primer caso es un recinto de 2x3 que se resuelve bien sea por la vía directa (gráfica 1) o resolviéndolo en dos mitades iguales de 1x3. Gráficas (2) y (3). El cálculo se realiza a 135.5 Hz.




*Gráfica 1:* Recinto de 2x3 m , presión calculada para el recinto total. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 135.5Hz**.**

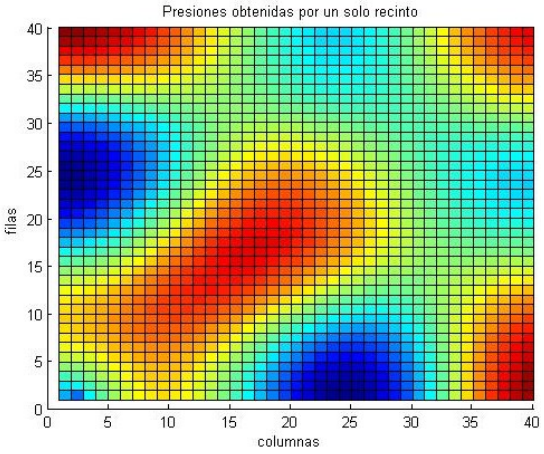



*Gráfica 2:* Dos recintos de 1x3 m, presión calculada para las dos mitades del recinto y aplicadas las condiciones de continuidad. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 135.5Hz.

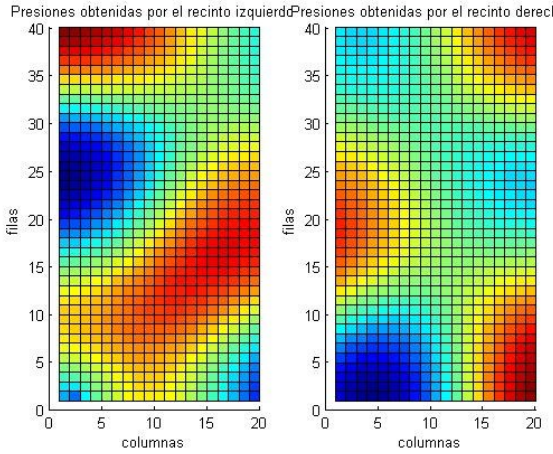



*Gráfica 3:* Dos recintos de 1x3 m, presión calculada, unidas las dos mitades y representadas en la misma escala. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 135.5Hz.

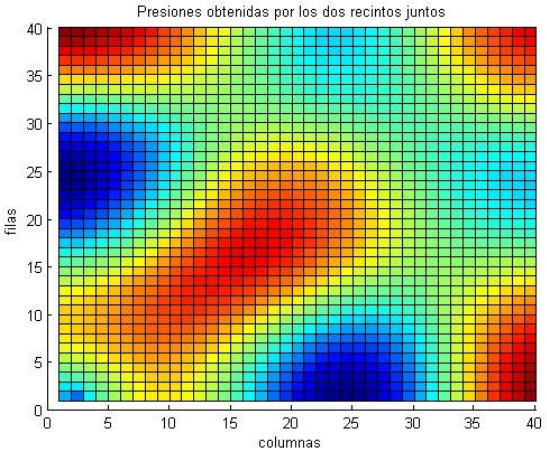
En el segundo caso (gráficas de 4 a 6) se sigue el mismo proceso para un recinto de 4x4 y el cálculo se realiza también en dos mitades a 100 Hz.




Gráfica 4: Un recinto de 4x4 m, presión calculada para el recinto total. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 100 Hz.




Gráfica 5: Dos recintos de 2x4 m, presión calculada para las dos mitades del recinto y aplicadas las condiciones de continuidad. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 100 Hz.




Gráfica 6: Dos recintos de 2x4 m, presión calculada para las dos mitades del recinto, unidas las dos mitades y representadas en la misma escala. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia de 100 Hz.

Veamos en los casos expuestos las dimensiones de las matrices a tratar.

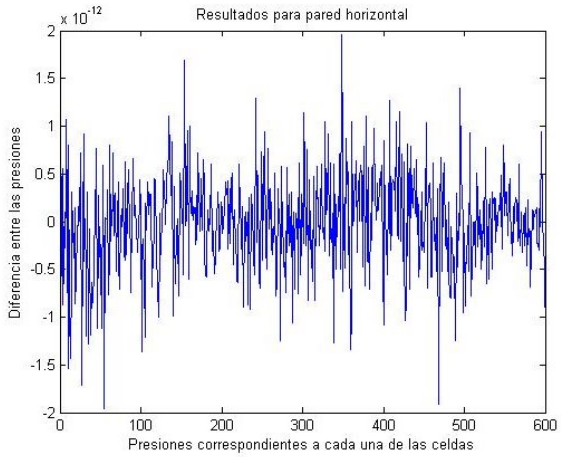
En el primer caso (gráficas 1 a 3) el cálculo directo supone resolver una matriz de 600x600 en tanto que la alternativa subestructurada escogida supone resolver una matriz de 300x300 y una matriz de 30x30.

En realidad serían, en general, dos matrices de 300x300 pero se ha escogido subestructar con dos recintos iguales con lo que sus matrices serán las mismas.

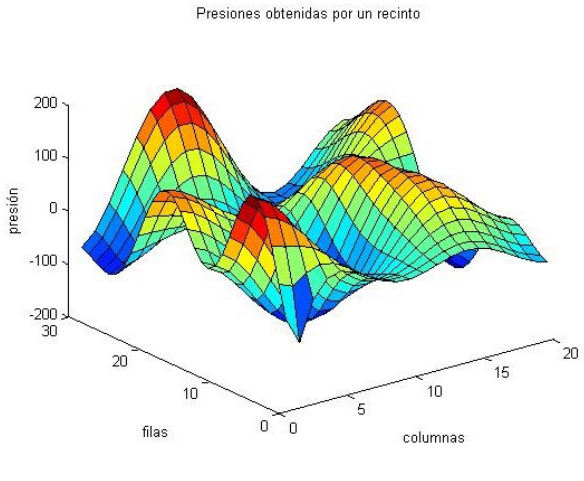
Para el mismo recinto de 2x3 podrían haberse escogido otras alternativas. Se ha escogido la que permite hacer menos cálculos pero si hubiera problemas de memoria se podrían hacer otras particiones que minimizarían las dimensiones de las matrices.

En las siguientes figuras pueden verse dos comparaciones de cálculo total o subestructurado con la diferencia en todos sus puntos.

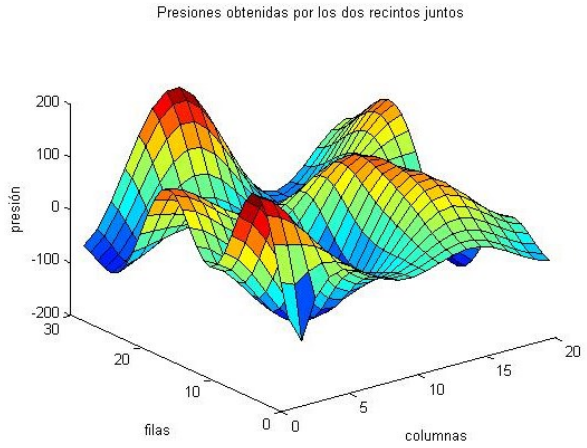
La comparación de los dos cálculos, uno directo y el otro subestructurado da diferencias del orden de $2^{-12}$ como máximo



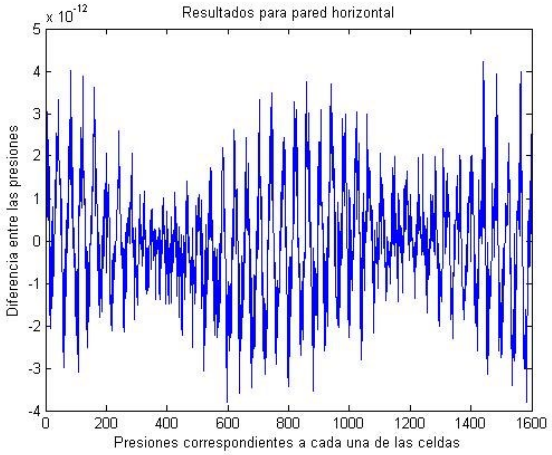

Gráfica 7*:* Diferencia entre los valores obtenidos para las presiones para un solo recinto y los valores obtenidos para dos recintos



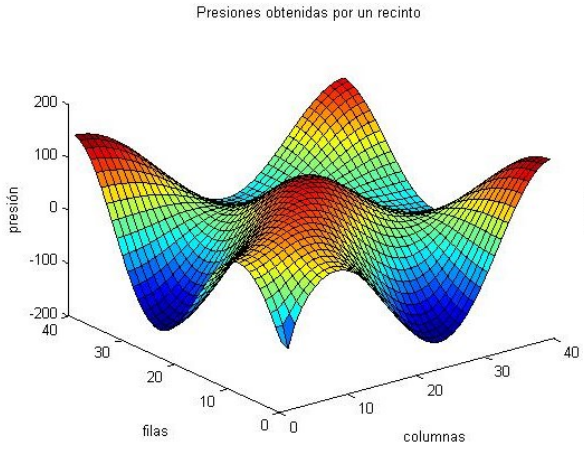

*Gráfica 8*: Presiones calculadas para un solo recinto de 2x3. Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia 100.0Hz.



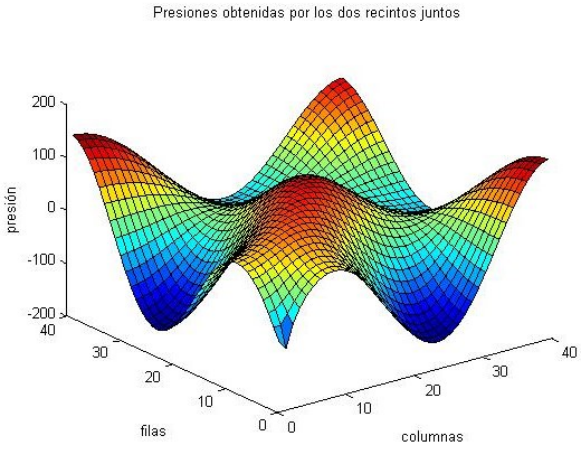

*Gráfica 9:* Presiones calculadas para dos recintos de 1x3 Se ha situado una fuente en la celda (1,2), frecuencia 100.0Hz.




*Gráfica 10:* Diferencia entre los valores obtenidos para las presiones para un solo recinto y los valores obtenidos para dos recintos




Gráfica 11**:** Presiones calculadas para un solo recinto de 4x4. Se ha situado una fuente en la celda (1,2) frecuencia 100.0Hz.




*Gráfica 12:* Presiones calculadas para dos recintos de 2x4. Se ha situado una fuente en la celda (1,2) frecuencia 100.0Hz.

**CONCLUSIÓN**

Se ha expuesto un método adaptado a problemas de acústica de recintos que permite de forma fácil la resolución de problemas de grandes dimensiones mediante subestructuración.

El método parte de resolver cada elemento de la subestructuración y cumplir además condiciones de continuidad. Dichas condiciones integran la continuidad en los subelementos interiores y también las condiciones en las paredes límite. El método permite conectar recintos interconectados, con material absorbente o con paredes divisorias.

La subestructuración permite además escoger el método más rápido y el que exige menos memoria siendo además muy adecuado para grandes recintos en tanto que pueden utilizarse muchos subvolumenes iguales tato en el interior como en el contorno.

El presente método "cose" los recintos simplemente con la condición de continuidad en velocidad que será igual velocidad si la frontera es aire-aire o puede ser un escalón de velocidad si se trata de la unión entre ambos recintos con una pared. El caso de una pared no se ha tratado ni se pretende incluir de forma inmediata.

El próximo paso debe ser el desarrollo de un software que permita el cálculo en 3D.

## AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación es parte del trabajo realizado en los proyectos de investigación I+D+i con referencias BIA 2012-36896 y BIA2014-56755-P.

## REFERENCIAS

[1] M. Shephard, M. Beall, R. O'Bara, B. Webster, Toward simulation-based design, Finite Elements in Analysis and Design 40 (12) (2004) 1575–1598.
[2] F.J. Fahy, J. Walker, Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration, Spon Press, 2004.
[3] W. Desmet, Mid-frequency vibro-acoustic modelling: challenges and potential solutions, in: Proceedings of ISMA 2002, Leuven, Belgium, 2002, pp. 835–862.
[4] B. Pluymers, B. Van Hal, D. Vandepitte, W Desmet, Trefftz-based methods for time-harmonic acoustics, Archives of Computational Methods in Engineering (2007) 343–381.
[5] P. Salvini, F. Vivio, Dynamic reduction strategies to extend modal analysis approach at higher frequencies, Finite Elements in Analysis and Design 43 (2007).
[6] M. Fischer, U. Gauger, L. Gaul, A multipole Galerkin boundary element method for acoustics, Engineering Analysis with Boundary Elements 28 (2004) 155–162.
[7] Y. Yasuda, T. Sakuma, Fast multipole boundary element method for largescale steady-state sound field analysis. Part II: examination of Numerical Items, Acta Acustica united with Acustica 89 (2003) 28–38.
[8] C. Vanmaele, D. Vandepitte, W. Desmet, An efficient wave based prediction technique for plate bending vibrations, Computer Methods in Applied Mechanical Engineering 196 (2007) 3179–3189.
[9] R.A. Cullum, R.A. Willoughby, Lanczos Algorithms for Large Symmetric Eigenvalue Computations: Theory, Society for Industrial Mathematics, 2002.
[10] J.K. Bennighof, M.F. Kaplan, M.B. Muller, Extending the frequency response capabilities of automated multi-level substructuring, AIAA Journal (AIAA2000-1574) (2000).
P. Ragnarsson et al. / Finite Elements in Analysis and Design 47 (2011) 195–199 1
[11] J.K. Bennighof, R.B. Lehoucq, An automated multilevel substructuring method for eigenspace computation in linear elastodynamics, SIAM Journal on Scientific Computing 25 (6) (2004) 2084–2106.
[12] R.R. Craig Jr., M.C.C. Bampton, Coupling of substructures for dynamic analyses, AIAA Journal 6 (7) (1968) 1313–1319.
[13] J.K. Bennighof, M.F. Kaplan, M.B. Muller, M. Kim, Meeting the NVH computational challenge: automated multi-level substructuring, in: Proceedings of the International Modal Analysis Conference XVIII (IMAC18), 2000.
[14] J.E. Manning. Use of measured mobility to improve sea predictions in the mid-frequency range, in: Proceedings of DETC99, 17th ASME Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, 1999.
[15] P. Ragnarsson, B. Pluymers, S. Donders, W. Desmet, Subcomponent modelling of input parameters for statistical energy analysis by using a wave-based boundary condition, Journal of Sound and Vibration 329 (8) (2010) 96–108.
[16] S. De Rosa, F. Franco, On the use of the asymptotic scaled modal analysis for timeharmonic structural analysis and for the prediction of coupling loss factors for similar systems, Mechanical Systems and Signal Processing 24 (2010) 455–480.
[17] B.R. Mace, Statistical energy analysis, energy distribution models and system modes, Journal of Sound and Vibration 264 (2) (2003) 391–409.
[18] S. Donders, B. Pluymers, P. Ragnarsson, R. Hadjit, W. Desmet, The wave-based substructuring approach for the efficient description of interface dynamics in substructuring, Journal of Sound and Vibration 329 (8) (2010) 1062–1080.

[19] S. Donders, Computer-aided engineering methodologies for robust automotive NVH design, Ph.D. Thesis, K.U. Leuven, Department of Mechanical Engineering, Division PMA, Leuven, Belgium, February 2008, Available online: /http://hdl.handle.net/1979/1698S.

[20] W. Gao, X.S. Li, C. Yang, Z. Bai, An implementation and evaluation of the AMLS method for sparse eigenvalue problems, ACM Transactions on Mathematical Software 34 (4) (2008).

[21] A. Kropp, D. Heiserer, Efficient broadband vibro-acoustics analysis of passenger car bodies using an fe-based component mode synthesis approach, Journal of Computational Acoustics 11 (2003) 1313–1319.

[22] MSC, MD Nastran 2007, 2007.

[23] CDH, CDH-AMLS User's Guide, 2008.

[24] A. Deraemaeker, I. Babuska, Ph. Bouillard, Dispersion and pollution of the˘ FEM solution for the Helmholtz equation in one, two and three dimensions, International Journal for Numerical Methods in Engineering 46 (4) (1999) 471–499.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# Estudio Acústico de la Basílica de Montserrat

PACS 43.55.Ka

Martí, Josep & Rossell, Ivana
Campus La Salle
Universitat RAMON LLULL
Sant Joan de La Salle, 42. 08022 Barcelona

**Abstract**
An acoustic study of the Basilica of Montserrat from the T30 measurements "in situ". Simulation of the acoustics of the venue through a calibrated virtual model. A study of their current quality parameters for the use of the word with the installed public address systems and musical quality rating for organ music and choral singing. It also offers suggestions to improve acoustics with new quality parameters.

**Resumen**
Estudio acústico de la Basílica de Montserrat a partir de mediciones del T30 realizadas “in situ”. Simulación de la acústica del recinto mediante un modelo virtual calibrado. Estudio de sus parámetros actuales de calidad para el uso de la palabra con la megafonía instalada y valoración de la calidad musical para usos de música de órgano y canto coral. Se ofrecen también propuestas de mejora acústica con la previsión de unos nuevos parámetros de calidad.

## Introducción

La basílica de Montserrat se inscribe, arquitectónicamente, entre la tradición gótica y la renacentista del siglo XVI en Cataluña.

Con la Guerra del Francés, el templo quedó en muy mal estado y no se pudo rehacer hasta finales del siglo XIX. La nave central tiene una longitud de 57 m, una anchura de 15,5 m y una altura de 23 m. A ambos lados dispone además de 6 capillas laterales abiertas a la nave central excepto la capilla del Santísimo que está cerrada por una gran vidriera. El volumen total con las capillas incluidas es de unos 20500 $m^3$. Entre el 1992 y el 1996 se llevaron a término una serie de reformas dirigidas por el arquitecto Arcadi Pla que devolvieron al templo su aire renacentista con una mejor iluminación natural a través de los óculos laterales y el cimborio octogonal (figura 1).




**Fig. 1. Imagen actual de la basílica**

## Medida del tiempo de reverberación

Como punto de partida se ha medido el tiempo de reverberación sin presencia de público y en horas nocturnas para evitar prácticamente cualquier tipo de ruido de fondo. El procedimiento de medida fue el de la fuente interrumpida utilizando el equipo Symphony con señal MLS amplificada a través de la megafonía del recinto. Naturalmente para una medida correcta se suprimieron todos los retardos aplicados, de forma que la interrupción fuera simultánea en todas las fuentes. Se escogieron 15 posiciones de medida, tal como se indica en la figura 2.

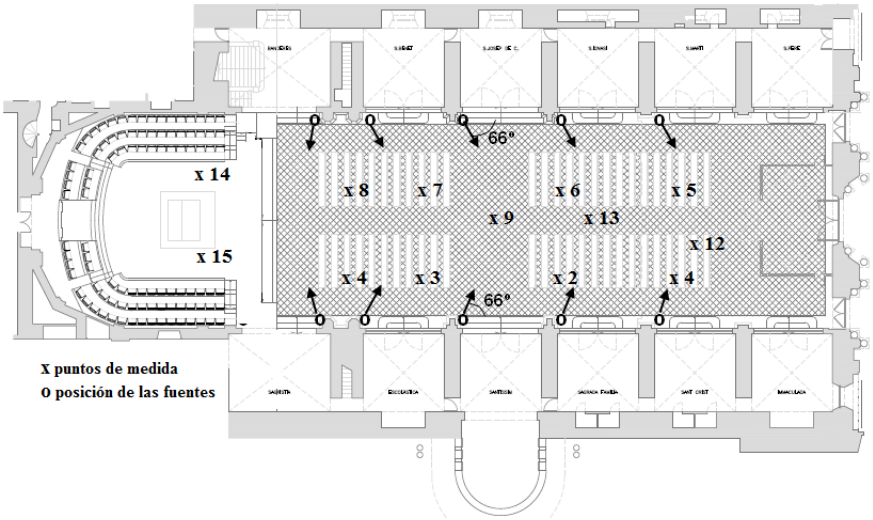



**Fig.2. Plano de la basílica con los puntos de medida (x) y las 10 fuentes con su orientación**

Los resultados del tiempo de reverberación obtenidos son los que se muestran en la tabla I. Los valores son muy uniformes a lo largo de toda la basílica, como se puede observar por las desviaciones típicas de las medidas. Evidentemente se trata de unos tiempos muy altos que no facilitan una buena inteligibilidad de la palabra. La situación mejora en condiciones de recinto ocupado por el público y el uso de la megafonía con unos retardos adecuados.

**Tabla I. Tiempos de reverberación sin presencia de público**

| Octavas | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Media del T30 | 4.58 | 5.10 | 5.36 | 5.18 | 4.51 | 3.23 | 1.71 | s |
| Desviación Típica | 0.35 | 0.15 | 0.09 | 0.05 | 0.09 | 0.057 | 0.1 | s |

Si consideramos la basílica totalmente ocupada por el público sentado en los bancos, según los coeficientes de absorción recogidos en la tabla III, los resultados previsibles mejoran, tal como se observa en la tabla II. De todas formas, se trata aún de unos valores excesivos para el uso de la palabra. Veamos a continuación como quedaría la valoración de recinto en estas condiciones.

**Tabla II. Tiempos de reverberación con la presencia de público**

| Octavas | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Previsión del T30 | 3.72 | 4.15 | 4.04 | 3.72 | 3.37 | 2.56 | 1.19 | s |

## Descripción de la basílica y modelo virtual calibrado

Para el estudio de los parámetros de calidad acústica del recinto se ha utilizado el programa de simulación CATT Acoustic v 9 con una representación simplificada, pero suficiente, de la basílica, tal como puede verse en la figura 3. La modelización del recinto se ha hecho con 330 planos y

sus respectivos coeficientes de absorción indicados en la tabla III. Estos coeficientes se han escogido a partir de bibliografía ya conocida sobre el tema. El programa pide también los coeficientes de difusión (scattering) para cada superficie. Estos coeficientes se han valorado a partir del tamaño de las irregularidades de las respectivas superficies en función de la longitud de onda a cada frecuencia.

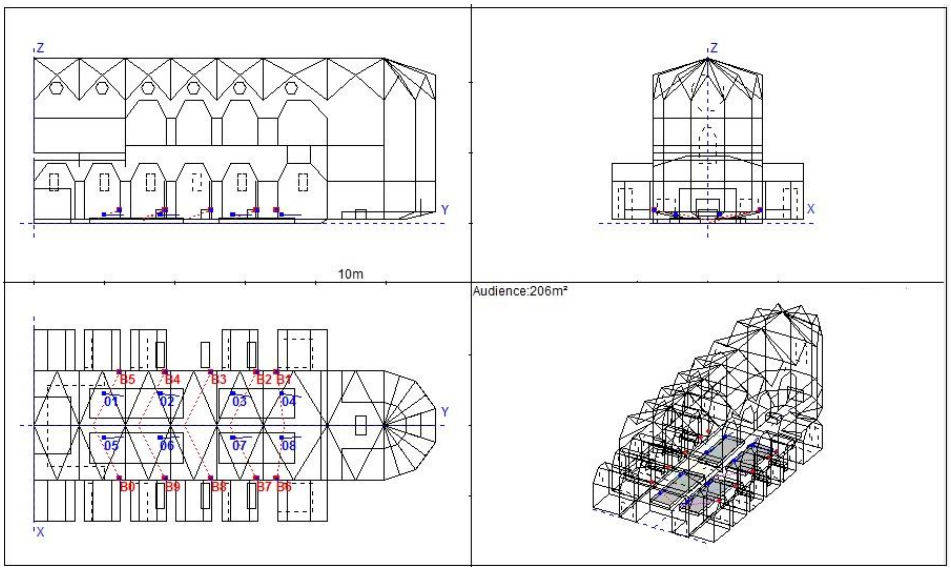



**Fig. 3. Modelo simplificado de la basílica**

Las aberturas correspondientes a las galerías superiores se han considerado como superficies absorbentes a modo de aberturas de los escenarios en los teatros (H. Arau [1]). Naturalmente, en este caso los coeficientes de absorción son poco conocidos y muy variables según las circunstancias. Por ello hemos optado por una estimación de estos valores a partir del proceso de calibración del recinto. Es decir, son valores obtenidos en un proceso de aproximación hasta la obtención de unos tiempos de reverberación idénticos a los medidos en la basílica.

**Tabla III. Coeficientes en % de absorción considerados en el estudio**

| **Material: \ octavas:** | **125** | **250** | **500** | **1000** | **2000** | **4000** | **Fuente** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Escayola | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | H. Arau [1] |
| Mármol | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | H. Arau [1] |
| Plancha metálica | 28 | 28 | 22 | 17 | 8 | 8 | |
| Madera sobre la pared | 10 | 11 | 10 | 9 | 8 | 10 | Bunker Audio [15] |
| Vidrieras | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | H. Arau [1] |
| Vidrios de gran superficie | 18 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 | L. Beranek [2] |
| Bancos ocupados 100% | 57 | 61 | 75 | 86 | 91 | 86 | H. Arau [1] |
| Parqué | 20 | 15 | 12 | 10 | 10 | 7 | Escuela Arq. Montevideo |
| Bancos sin público | 16 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | T. Zamarreño [8] |
| Asientos de madera del coro | 40 | 30 | 20 | 17 | 15 | 10 | B. Bies & C.H. Hansen [13] |
| Columnas (enlucido) | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | H. Arau [1] |
| Órgano | 65 | 44 | 35 | 33 | 32 | 30 | L. Beranek [3] |
| Galerías | 4 | 11 | 21 | 35 | 35 | 30 | A partir de la calibración |
| Cortinas algodón 0,5 Kg/m$^2$ | 30 | 45 | 65 | 56 | 59 | 71 | Petersen [12] |

### Parámetros que definen la calidad del recinto para la transmisión de voz

El estudio acústico de los recintos de culto ha sido estudiado por numerosos autores en los últimos años [4], [5], [6], [7], [8], [9], siguiendo otros estudios realizados para grandes recintos utilizados para la comunicación oral o para la reproducción musical [10], [11], [14]. En nuestro caso hemos estudiado los parámetros acústicos para la reproducción de la voz mediante la

megafonía instalada en la basílica. Después de un primer estudio que detectó una cierta falta de cobertura en la parte posterior del recinto, se instalaron dos fuentes más en las dos columnas posteriores de la basílica. Hemos simulado la radiación de las 12 columnas Panaray MA12 de la marca Bose que sonorizan la parte de público, con la respuesta en frecuencia y la directividad ofrecida por el fabricante. Lo primero que observamos es, evidentemente, una disminución importante del tiempo de reverberación respecto al caso de la basílica sin público, lo cual conlleva una mejora de la definición de la palabra (D50) y de la Inteligibilidad (STI), tal como puede verse en la tabla IV. Observamos también una variación del nivel SPL a 1 KHz sobre la zona de público y de la uniformidad de cobertura a la misma frecuencia. Medimos esta uniformidad a partir de la desviación estándar **σ** de los valores observados sobre esta superficie. Naturalmente, con la presencia de público se reduce el nivel SPL aproximadamente en 1 dB y disminuye ligeramente la uniformidad de cobertura. El STI con público se acerca al valor mínimo recomendable de 0,6 para una buena inteligibilidad, valor que se explica por la aportación del sistema de megafonía. En la figura 4 puede apreciarse la distribución de la definición D50 en presencia del público. Consideramos este parámetro a la frecuencia de 2 KHz, ya que esta banda de octava es la más significativa para la inteligibilidad de la palabra. Su valor resulta aceptable.

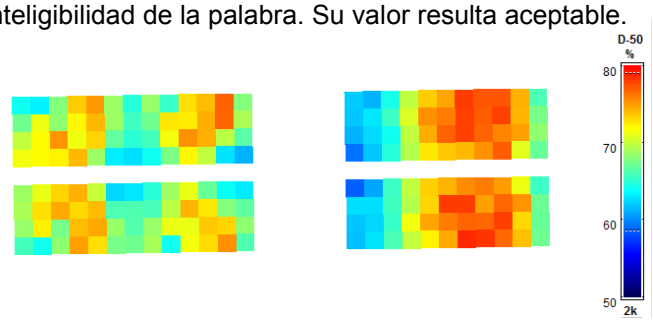



**Fig. 4 Distribución del D50 a 2 KHz sobre la audiencia**

**Tabla IV. Comparativa de parámetros relativos a la voz entre basílica vacía y basílica con público**

| Parámetros | Tmid | D50 a 2 KHz | STI | SPL a 1 KHz | σ del SPL 1 KHz |
|---|---|---|---|---|---|
| Valor medio sin público | 5,29 s | 58,60 % | 0,53 | 80,57 $dB_{SPL}$ | 0,34 $dB_{SPL}$ |
| Valor medio con público | 3,88 s | 69,91 % | 0,58 | 79,43 $dB_{SPL}$ | 0,38 $dB_{SPL}$ |

## Uso de la basílica para audiciones musicales con el órgano

La basílica de Montserrat se ha caracterizado siempre por el uso del canto litúrgico acompañado del órgano y por el canto de los monjes y de la escolanía del monasterio. Últimamente se ha instalado un nuevo órgano de tubos en la parte lateral izquierda que ofrece la posibilidad de importantes interpretaciones musicales. Será interesante verificar la calidad acústica del recinto para este tipo de conciertos. Veamos cuales son los parámetros de la basílica en presencia de público sentado en toda la zona de bancos. Consideramos un modelo omnidireccional del órgano con una potencia equivalente a ruido rosa de 90 dB por octava a la distancia de 1 m. Como parámetros importantes para la valoración de la calidad musical del recinto consideraremos el C80 que discrimina la diferencia entre el sonido inicial y el sonido posterior a los 80 ms, la fracción de energía lateral LF que da la sensación de sonido envolvente, el "Strength" G o ganancia introducida por el efecto reverberante del recinto, la calidez que nos indica la buena reproducción de los sonidos más graves y el brillo o buena amplificación de los sonidos más agudos. También consideraremos el valor SPL medio y su desviación estándar **σ** para valorar la uniformidad de cobertura sobre el área de audiencia (tabla V).

**Tabla V. Parámetros de calidad musical con la presencia del público**

| Parámetros | C80 a 1 KHz | G A 1 KHz | LF a 1 KHz | Calidez | Brillo | SPL a 1 KHz | σ del SPL a 1 KHz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Valor medio con público | -4,25 dB | 3,75 dB | 13,85 % | 1,01 | 0,76 | 81,68 $dB_{SPL}$ | 1,6 $dB_{SPL}$ |

El tiempo de reverberación (3,88 s) es un poco alto para el caso que nos interesa. Para la música de órgano y un volumen de 20500 $m^3$ el tiempo óptimo sería del orden de los 2,5 s. Según las

recomendaciones para el caso de audiciones musicales el valor de C80 está un poco por debajo de los valores óptimos (entre -4 y +4) [1]. El valor de G es aceptable ya que se acerca al valor mínimo recomendado (entre 4 y 6 dB) [18]. El valor de LF se encuentra por debajo de los valores mínimos recomendados (un 19 %) [18]. La calidez, en cambio, está dentro de los valores óptimos (entre 0,9 y 1,3) y el brillo se acerca también el valor óptimo (entre 0,8 y 1) [1].

### Uso de la basílica para el canto coral

La formación y la actuación de la escolanía constituyen una actividad emblemática del monasterio de Montserrat. En la basílica se dan muchas de estas actuaciones así como en el caso de otras agrupaciones corales que actúan también en el mismo recinto. En el caso del canto coral consideramos la basílica en presencia de público y estudiamos la posible situación del coro detrás del altar o en la parte delantera del presbiterio, para detectar las diferencias en cuanto a la calidad de la audición en ambos casos. La escolanía utiliza siempre la posición posterior del altar mientras que otros grupos corales utilizan más bien la parte delantera del presbiterio. Para simular la coral utilizamos el modelo previsto por el programa CATT para la voz humana con su directividad característica y un nivel alto, con unos 50 cantores. Veamos cuales son las diferencias entre ambos casos (tabla VI).

**Tabla VI. Parámetros de valoración del canto coral sobre la audiencia en presencia de público**

| Parámetros | C80 a 1 KHz | C50 a 1 KHz | STI | LF a 1 KHz | SPL a 1 KHz | σ del SPL a 1 KHz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Detrás del altar | -5,59 dB | -7,33 dB | 0,38 | 14,13 % | 59,65 $dB_{SPL}$ | 1,16 $dB_{SPL}$ |
| Delante del altar | -1,69 dB | -2,89 dB | 0,49 | 13,00 % | 61,26 $dB_{SPL}$ | 2,41 $dB_{SPL}$ |

Claramente se observa que la calidad de audición para el canto coral es superior en el caso del coro situado delante del altar con una mayor cercanía del público. Particularmente mejoran los parámetros C80, C50, STI y el nivel SPL. Las disminuciones en la fracción de energía lateral y en la uniformidad de cobertura son muy pequeñas y explicables por la mayor proximidad entre el coro y el público. Los valores de inteligibilidad, naturalmente son más bajos que en el caso de la palabra reproducida por el sistema de megafonía considerada anteriormente. Aquí hemos supuesto que los coros no utilizan la megafonía del recinto con la correspondiente pérdida de modulación asociada a la reverberación de la basílica. El efecto se nota de manera especial en la parte posterior de la audiencia con una importante atenuación del sonido directo respecto del sonido reverberante (figura 5 y 6). Con la posición delante del altar la inteligibilidad oscila entre 0,39 y 0,72, mientras que con la posición posterior al altar lo hace entre 0,34 y 0,44.La claridad con el coro delante del altar oscila entre – 5 y +6 dB, mientras que con el coro detrás del altar la claridad oscila entre -8 y -4 dB (figura. 7 y 8).

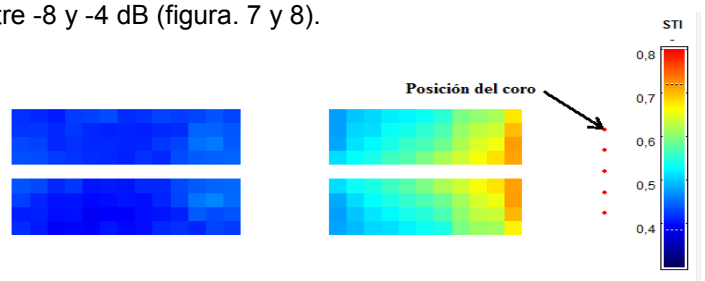



**Fig. 5 Distribución del STI sobre la audiencia con el coro delante del altar**

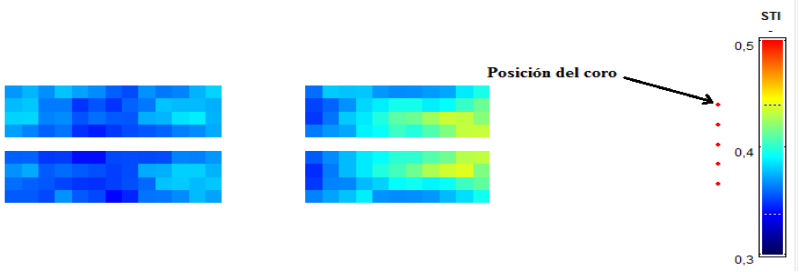



**Fig. 6 Distribución del STI sobre la audiencia con el coro detrás del altar**

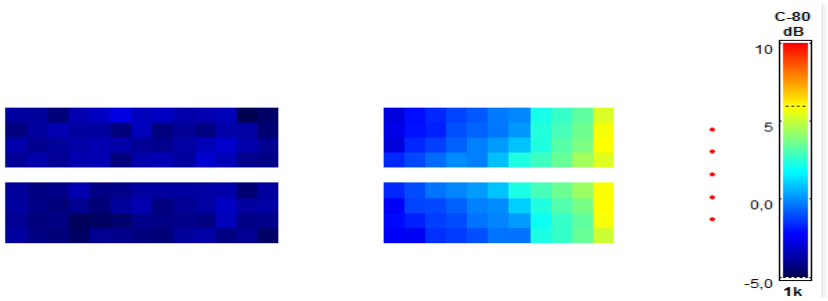



**Fig. 7 Distribución de C80 a 1 KHz sobre la audiencia con el coro delante del altar**

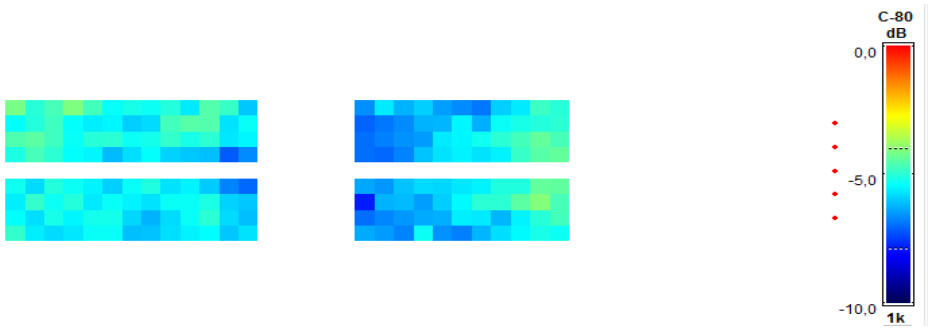



**Fig. 8 Distribución de C80 a 1 KHz sobre la audiencia con el coro detrás del altar**

## Propuesta de mejora

Vistas las deficiencias que presenta la basílica, tanto para la voz como para la música, proponemos una posible mejora de la calidad acústica para ambas aplicaciones. La propuesta consiste en añadir un revestimiento de alguna de las zonas perimetrales con cortinas de alta absorción acústica. Podríamos pensar, por ejemplo, en las aberturas de las galerías del piso superior y en las áreas con vidrios de gran superficie, como son el cristal de la capilla del Santísimo, las cristaleras de la entrada y las paredes posteriores que están debajo del coro. Serían en total unos 440 $m^2$ de superficie con cortinas de algodón de 0,5 $Kg/m^2$, fruncidas al 50 % y de un color discreto que no rompiese la estética de la basílica. Cubriendo estas superficies con este tipo de cortinas se obtendrían los resultados que se indican en la tabla VII.

**Taula VII. Comparativa de parámetros en vacío, con público y con público más cortinas**

| Parámetros | En vacío | Con público | Con público y cortinas | Mejora en unidades JND |
|---|---|---|---|---|
| Tmid (s) | 5,29 | 3,88 | 3,23 | 3,4 |
| Calidez | 0,897 | 1,01 | 1,05 | |
| Brillo | 0,723 | 0,76 | 0,78 | |
| D50 a 2 KHz con megafonía (%) | 58,60 | 69,91 | 78,19 | 2,4 |
| C80 a 1 KHz con el órgano (dB) | -6,68 | -5,11 | -4,25 | 1 |
| C80 a 1 KHz coro delante del altar (dB) | | -1,69 | -1,09 | 0,6 |
| LF a 1 KHz con el órgano (%) | 17 | 14,63 | 13,85 | -1,1 |
| LF con el coro delante (%) | | 13,00 | 12,78 | -0,3 |
| STI con la megafonía | 0,53 | 0,58 | 0,64 | 2 |
| STI con el coro delante del altar | | 0,49 | 0,53 | 1,3 |
| G con el órgano (dB) | 7,68 | 4,74 | 3,75 | -1 |
| SPL a 1 KHz con megafonía (dB) | 80,57 | 79,87 | 78,01 | |
| σ SPL a 1 KHz con megafonía (dB) | 0,34 | 0,39 | 0,67 | |
| SPL a 1 KHz con el órgano (dB) | 85,61 | 82,68 | 81,68 | |
| σ SPL a 1 KHz con el órgano (dB) | 0,85 | 1,21 | 1,60 | |
| SPL a 1 KHz coro delante (dB) | | 61,26 | 60,55 | |
| σ SPL a 1 KHz con el coro delante (dB) | | 2,41 | 2,8 | |

En la tabla VII recogemos una comparativa de los parámetros acústicos de la basílica en las tres situaciones: en vacío, con público y añadiendo las cortinas con los coeficientes de absorción que se indican en la tabla III. En la misma tabla VII se valora la mejora de algunos parámetros con las cortinas en unidades JND ("Just Noticeable Differences") [16], [17]. Todos los parámetros mejorarían ligeramente excepto los niveles SPL i los valores de LF i G que, naturalmente, sufren una ligera reducción debido a la disminución de la reverberación.

Con la instalación de las cortinas se alcanzarían unos valores bastante aceptables, tanto para la palabra como para la música. En cuanto a la palabra, el valor de D50 = 78,19% superaría holgadamente el 65% recomendado y el STI = 0,64 calificaría el recinto claramente como de inteligibilidad buena. La claridad musical con el órgano alcanzaría un nivel de C80 = -4,25 dB, un valor aceptable sin llegar al valor óptimo (entre -2 dB y + 2 dB). El valor de G óptimo está entre 4 y 6, y en nuestro caso, con un valor medio de 3,75 y en presencia de público, se acercaría mucho a este intervalo (figura. 9). La fracción de energía lateral con un LF = 13,85 % se mantiene cerca del valor mínimo recomendado del 19%. La uniformidad de cobertura a 1 KHz con la música de órgano alcanza una desviación estándar de 1,6 dB que es un resultado excelente (figura 10). Respecto al canto coral con el coro delante del altar se consigue un valor óptimo a 1 KHz de C80 = -1,09 y un valor muy aceptable de uniformidad de cobertura con una desviación estándar de 2,8 dB.

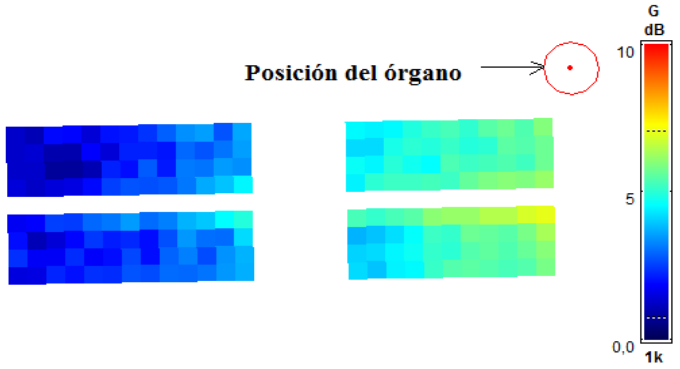



**Fig. 9. Valor de G con música de órgano a 1 KHz sobre el área de público con las cortinas**

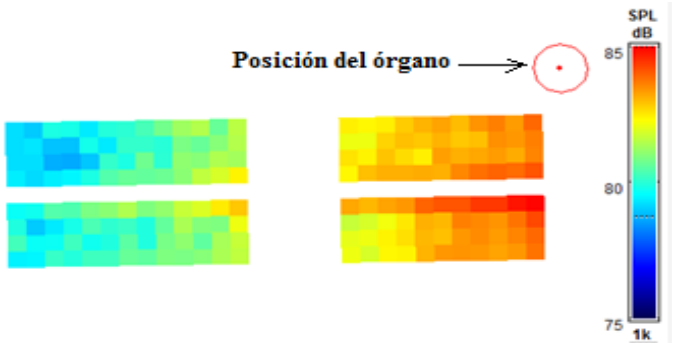



**Fig. 10. Nivel SPL de la música de órgano a 1 KHz sobre el área de público con las cortinas**

## Conclusiones

La megafonía instalada en el templo está controlada mediante el programa "Audia" muy sofisticado y de alta calidad, que permite una gran flexibilidad en la regulación de todo el sistema de sonorización. Una vez calculados adecuadamente los retardos aplicados a las columnas acústicas que sonorizan toda la basílica, se obtienen unos resultados de refuerzo sonoro regularmente aceptables, aunque no óptimos. En el caso de la música o el canto no se suele

utilizar la megafonía y los resultados dependen únicamente de las condiciones acústicas del templo. Básicamente el problema principal estriba en la excesiva reverberación del recinto. En el caso de la música de órgano la reverberación es menos problemática y el efecto de música envolvente con las reflexiones de las paredes laterales resulta no óptima pero sí aceptable. La presencia de las cortinas mejoraría ligeramente la claridad musical y aportaría una mejora considerable en la definición y la inteligibilidad de la palabra. En cuanto a la posición del coro no cabe duda que, por lo que hace a la inteligibilidad, la situación delante del presbiterio es mucho mejor que la posición detrás del altar. Finalmente, queremos advertir que las valoraciones numéricas de los parámetros de calidad acústica no se han de tomar como valores exactos sino suficientemente orientativos pues, como es sabido (Vorländer [14]), los programas de simulación no van más allá de unos valores aproximados que dan siempre una previsión aceptable.

## Agradecimientos

Es muy de agradecer la disponibilidad de la comunidad de monjes y en particular de los responsables de la basílica y de su megafonía para facilitar las pruebas acústicas en el recinto durante horas nocturnas, evitando así los ruidos que hubieran distorsionado las mediciones.

## Bibliografía

[1] H. Arau. “ABC de la Acústica Arquitectónica”. Ediciones CEAC. Barcelona. 1999.
[2] L. Beranek. “Concert and Opera Halls”. Acoustical Society of America. 1996. Base de datos programa CATT Acoustic
[3] L. Beranek. “Concert Halls and Opera Houses”. 2nd. Edition. Springuer–Verlag. New York. 2002.
[4] Ettore Cirillo and Francesco Martellotta. “Sound propagation and energy relations in churches”. JASA.118 (1) 232 – 248 (2005).
[5] David L. Klepper. “The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music”. JASA 99 (1), 417-425 (1996)
[6] Francesco Martellotta. “A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches”. JASA 125 (3), 1281-1284 (2009).
[7] Francesco Martellotta. “Identifying acoustical coupling by measurements and prediction models for St. Peter’s Basilica in Rome”. JASA 126 (3), 1175-1186 (2009).
[8] T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón. “Simulación acústica y virtualización en recintos de culto. International Seminar on virtual acoustics”. Valencia, 38-61 (2011).
[9] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá. “A comparison of different Techniques for Simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume basílica in Valencia, Spain”. Acta Acustica united with Acoustica. Vol 97 155-170 (2011).
[10] M. Barron and L. J. Lee. “Energy relations in concert auditoriums I”. JASA 84, 618-628 (1988)
[11] B. I. Delenbäck. “Engineering principles and techniques in room acoustics prediction”. CATT. Gothenburg. Sweden. (2010).
[12] Jörgen Petersen. Biggeforskningsinstitut. (1984). Base de datos programa CATT Acoustic.
[13] D. B. Bies y C. H. Hansen. “Encyclopedia of Acoustics”. John Wiley & Sons, Inc. (1979). Base de datos programa CATT Acoustic.
[14] M. Vorländer. “Models and algorithms for computer simulations in room acoustics”. International Seminar on Virtual Acoustics, 72-82. Valencia (2011).
[15] www.Bunker Audio.com (Portal de sonido. México D.F.).
[16] I Bork. “Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part II: Calculations”. Acta Acustica United with Acustica. Vol 91, 753 – 763 (2005)
[17] J.S. Bradley, R. Reich, S. G. Norcross. “A just noticeable difference in C50 for speech”. Applied Acoustics, Vol. 58 (2), 99-108 (1999).
[18] A. Carrión. “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Ediciones UPC, Barcelona.1998.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

**PACS** 43.55 ka

# ESTUDIO ACÚSTICO DE CLAUSTROS. GRADO DE INFLUENCIA DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN LA SIMULACIÓN ACÚSTICA DE UN CLAUSTRO.

Serrano Rodrigo, Pau; Guillen Guillamón, Ignacio; Gómez Lozano, Vicente; Llopis Reyna, Ana.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universitat Politècnica de València.
Camino de Vera s/n. 46022 Valencia
España
0034-963877524.
iguillen@fis.upv.es

## ABSTRACT

Acoustic simulations within historical building are gaining momentum and becoming more and more necessary, therefore the need to know and understand the features of all materials implemented in the construction of the building. This research focuses on the effect of scattering coefficients of each material on the acoustical simulation of cloisters. For this purpose researchers analyzed the acoustical parameters commonly used for the characterization of each acoustical enclosures. Thus, different simulations were developed mantaining the same simulation features and tuning only one variable, the scattering conefficient of some materials. At the end values proceeding from simulation results were compared with the ones measured on-site.

## RESUMEN

Las simulaciones acústicas de recintos históricos son cada vez más necesarias, por ello existe la necesidad de conocer mejor las características de los distintos materiales utilizados.
En este trabajo se estudia la influencia de los coeficientes de difusión de los materiales utilizados en la simulación de claustros. Para ello se analizan los valores de los parámetros acústicos utilizados comúnmente para la caracterización de recintos musicales. Éstos se obtienen con la realización de diferentes simulaciones manteniendo las mismas características y cambiando el coeficiente de difusión de determinados materiales. Todo ello, comparado con los valores obtenidos a través de mediciones in situ.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los claustros son recintos donde cada vez más son utilizados como espacios para la realización de distintas actividades culturales. Una de las más difundidas es la realización de conciertos de música. Principalmente con agrupaciones pequeñas como pueden ser las de cámara o similares.

Considerándose válidas las simulaciones acústicas para predecir el comportamiento de una sala o recinto, siguen habiendo grandes incertidumbres a la hora de llevar a cabo simulaciones acústicas en recintos abiertos: El nivel de detalle del modelo a realizar, la manera de representar las superficies curvas, la difracción, el número de rayos de la simulación, la elección de las características de los materiales (coeficientes de difusión y absorción) entre otras [1]. Todo estos parámetros, quedan a expensas de la experiencia del técnico que realiza la simulación, sin tener una metodología determinada para definir estos parámetros.

Estas incertidumbres aumentan cuando los recintos de estudio son históricos. El motivo principal es la falta de información para realizar el modelo, ya que no se tiene un conocimiento lo suficientemente amplio del comportamiento de los materiales y sistemas constructivos de los que se componen. Principalmente por la imposibilidad de realizar estudios de estos materiales por su antigüedad e inviabilidad económica.

Otros espacios históricos como las iglesias, en estos últimos años han acaparado la atención de parte de los investigadores en el campo de la acústica de salas, debido a la necesidad que ha surgido por una parte, de dar otros usos diferentes para así poder conservarlos [2,3] y por otra, de preservar el patrimonio acústico de los mismos.

Simulaciones acústicas por ordenador de recintos históricos eclesiásticos están siendo estudiadas. Se han realizado estudios caracterizando acústicamente las iglesias del sur de España analizando la respuesta acústica mediante mediciones in situ con las que se analizaban los valores obtenidos de parámetros acústicos tanto temporales, energéticos como espaciales [4,5,6]. Posteriormente, estos mismos autores comparan los resultados obtenidos en las mediciones in situ con simulaciones realizadas por ordenador. Utilizan procesos interactivos para estimar los coeficientes de absorción de los materiales que no se tiene información y asignan coeficientes de difusión de estos mismos basándose en el tamaño de las irregularidades de las superficies [7-8]. Otros grupos han realizado estudios similares de las iglesias de sus regiones como en Italia [9] y Polonia [10] entre otros, caracterizando los recintos y realizando simulaciones de los mismos.

La principal diferencia entre los claustros respecto a los recintos más estudiados (teatros, auditorios, iglesias y catedrales) es que son recintos al aire libre.

Por otra parte, se encuentran estudios de teatros griegos y romanos, que siendo recintos al aire libre, las dimensiones, proporciones y distribuciones son muy diferentes a la gran mayoría de claustros. A partir del denominado Erato Project [11], se amplio el interés en este tipo de teatros dando lugar a numerosos estudios sobre la acústica y/o su simulación, ya que con este proyecto se pudo medir in situ los parámetros acústicos de diferentes teatros. Se realizan restauraciones virtuales, basándose en estudios arqueológicos y de su propia historia [12]. Posteriormente realizan simulaciones acústicas teniendo en cuenta los diferentes materiales que se utilizaban en cada momento [13] con el fin de recuperar el patrimonio acústico. Con ello se puede observar la relación directa entre la arquitectura y la acústica viendo como evolucionan de manera conjunta [14]. También se ha estudiado más concretamente la influencia de los coeficientes de dispersión en la simulación de estos recintos, un ejemplo lo tenemos en el estudio del teatro romano de Itálica (Sevilla) [15] donde se observa la influencia de estos coeficientes al modificarlos en los materiales de la cávea principalmente.

Para el desarrollo de esta investigación se han tenido en cuenta los estudios nombrados sobre simulaciones acústicas de recintos eclesiásticos por la similitud de algunos de los materiales de los recintos ya que gran parte de ellos fueron construidos relativamente en la misma época. Tipológicamente en la mayoría de monasterios o centros conventuales se encuentran iglesias y claustros. Por otro lado, están los estudios realizados a teatros griegos y romanos, donde siendo recintos con una disposición y dimensiones diferentes de los claustros, tienen la característica en común de ser recintos al aire libre. Con ello se observa como se ha tratado la cuestión de utilizar los software destinados para la simulación de la acústica de salas en recintos al aire libre, principalmente como definir el aire como un material más perteneciente al recinto.

En este trabajo se ha realizado una medición in situ del claustro del “Monestir del Corpus Christi” situado en en la localidad de Lluxent. Posteriormente se llevo a cabo una simulación acústica del claustro, realizando un modelo 3D en CAD del mismo y exportándolo al software Odeon Room Acoustic 10.0. El modelo se ajustó basándose en las datos obtenidos del tiempo de reverberación en la medición in situ. Tomando este modelo como base, se realizaron

diferentes simulaciones, una modificando el tipo de material con el que se representa las bóvedas perimetrales y otras modificando los coeficientes de difusión del material de fachada en las zonas donde se observaban más irregularidades en la superficie. Con el objetivo de observar la influencia en los resultados de varios parámetros acústicos de dicha modificación en la difusión. Todo ello, comparado con los valores obtenidos a través de mediciones in situ.

## EL CLAUSTRO DEL "MONESTIR DEL CORPUS CHRISTI"

El claustro de estudio está situado en la localidad de Lluxent, en la comarca de la "Vall d'Albaida" de la Comunidad Valenciana. Forma parte del monasterio de este pueblo llamado el "Monestir del Corpus Christi" o "el Convent". Está situado a las afueras del pueblo, alejado del núcleo urbano, en la montaña conocida como "Mont Sant".

Tanto el monasterio, como la iglesia que se observan actualmente en la localidad, se empezaron a construir en el s. XIII. En los s. XVI y XVII, el monasterio se convierte en un importante referente cultural y religioso y el número de miembros de la comunidad aumenta. En este momento se propicia una nueva etapa de construcción para ampliar espacios, pero no es hasta el s. XVIII, donde se vuelve a iniciar una importante etapa constructiva cuando se edifica el claustro con la planta baja y primera planta que se puede observar en la actualidad.

Tras 4 siglos de pertenencia a la orden eclesiástica de los dominicos, en 1835 pasó a pertenecer a manos privadas, donde al darle otros usos se modificaron ciertas zonas del monasterio. Principalmente la compartimentación de la primera planta del claustro, aunque el patio del mismo no sufrió grandes modificaciones. En 1980 pasa a pertenecer a la Diputación de Valencia, realizando una rehabilitación del claustro debido a su avanzado estado de deterioro que termina en el año 2010 (Fig 1).



**Figura 1.** Estado Actual del claustro .

El material mayoritario del revestimiento de la fachada y el pasillo perimetral es un enfoscado fino de cemento pintado. El suelo del claustro es cerámico, tanto en el exterior como en el interior. Y por último destacar, el revestimiento de mármol del pozo, que se encuentra en el centro del claustro.

Respecto las dimensiones, simplemente nombrar que la planta es aproximadamente un cuadrado de unos 20 m de lado y que la altura total es de unos 9,50 m. El volumen total de

recinto es de 4.848 $m^3$. De este volumen, 1.888 m3 pertenecen al pasillo perimetral, el cual tiene unas dimensiones de 3,65 m de ancho y 4,65 m en su punto más alto de la bóveda.

## METODOLOGÍA

### Medición in situ

La medición in situ se llevo a cabo siguiendo el procedimiento que a continuación se describe, tomando de referencia la normativa ISO3382 [16]. Se excitó el recinto de estudio mediante un sistema de emisión sonora. La respuesta acústica de la sala ante la excitación producida se registró por un sistema de adquisición de señales. Y finalmente, a partir de las señales registradas por el equipo de adquisición, se determina el valor de los parámetros acústicos objetivos del recinto utilizando un software especializado.

El sistema de emisión con el que se excitó la sala está formado por un PC, una tarjeta de sonido, un amplificador (Lab. 300 de Lab Grupper), y una fuente sonora dodecaédrica (Omnipower 4296 de Bruel & Kjaer, con 12 altavoces). Para la adquisición de la respuesta de la sala a la excitación sonora realizada se utilizó el mismo PC con la tarjeta anteriormente nombrada y un micrófono omnidireccional y bidireccional (Shure KSM44). La señal de excitación utilizada fue un “Sweep” o barrido sinusoidal.

Respecto la determinación de los parámetros acústicos, el software utilizado fue el Brüel & Kjaer 7841 Dirac. Con él se registró y se grabó la señal recibida por los micrófonos y posteriormente se realizó tratamiento en despacho de los archivos acústicos recogidos en la medición para obtener los parámetros acústicos estudiados.

En el momento de la medición el claustro se encontraba sin presencia de público. Se realizaron mediciones con 4 posiciones de la fuente. Para este estudio se ha utilizado solamente los datos recogidos en la posición 1 de la fuente y 6 puntos de recepción (Fig 2).

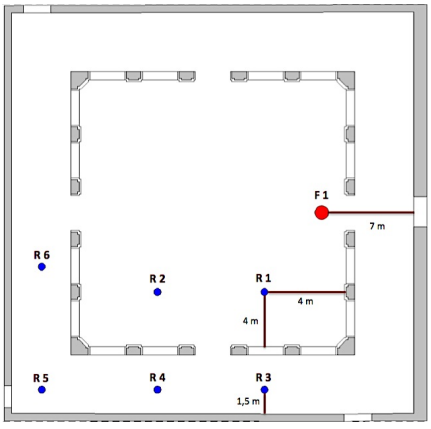



**Figura 2**. Posición de la fuente y los receptores

Como se observa en la Fig. 2, la fuente esta situada en el eje de simetría, a 7 m. de la pared del pasillo. Los receptores se situaron en 6 puntos diferentes, a una altura de 1,50 m. Por las dimensiones del claustro (relativamente pequeñas) se situaron dos receptores en el exterior, y cuatro en el interior de los pasillos, distribuidos tal y como se muestran en las imágenes. Se tomaron solo mediciones de la mitad del recinto, ya que se comprobó que la simetría geométrica correspondía a una geometría acústica.

Para la caracterización del claustro, a través del registro de su respuesta impulsiva, se obtuvieron los parámetros acústicos más relevantes para un uso musical. Estos parámetros son el Tiempo de Reverberación ($T_{30}$), el Tiempo de Caída Inicial (EDT), la Claridad Musical ($C_{80}$) y la Eficiencia Lateral (LF) [17].

Con el $T_{30}$ se calcularon el Tiempo de Reverberación medio (RTmid), la Calidez acústica (BR) y el Brillo (Br). El EDT está representado a través del parámetro $EDT_{mid}$. La Claridad se ha calculado como la media directa de los valores para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz. Por último, la LF se representa a través del parámetro $LF_{E4}$, siendo una media directa de los

valores obtenidos en las frecuencias de 125, 250, 500 y 1000 Hz. Todo ello está representado en la Tabla 2.

**Simulaciónes**

Para la elaboración de la simulación se realizó un modelo geométrico del recinto (Fig. 3). Un modelo bastante detallado con 6.103 planos. Este modelo se exporto al software Odeon Room Acoustic. Para dar el modelo como valido se realizó una calibración del mismo ajustando los valores de los coeficientes de absorción para cada octava del material con el que se cuenta con menor información, en este caso el enfoscado de cemento pintado que se realizó en la rehabilitación del recinto. La simulación se dio por correcta cuando el valor del RT de la misma tuvo un diferencia menor al 5% (tal y como marcan las JND) respecto a los valores obtenidos en la medición in situ. El tiempo de respuesta se determinó en 3,5 segundos, y el numero de rayos de la simulación fué de 209.880. La temperatura considerada en la simulación fue de 20 ºC, y una humedad relativa del 50%.

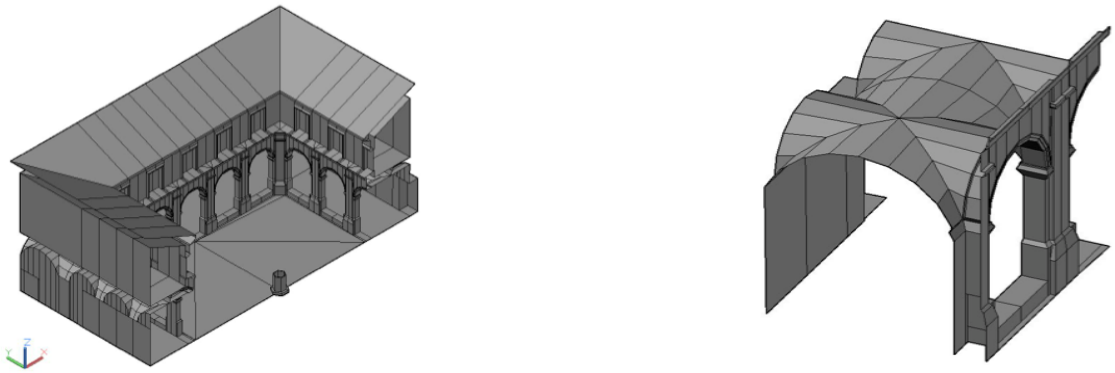


**Figura 3.** Modelo Geométrico .

Los materiales utilizados para la simulación se detallán en la Tabla 1, en la que se indica la superficie, porcentaje y coeficientes de absorción de cada material.

| Material | Area | % | Frecuencias | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Enlucido de cemento* | 1.419,00 | 50,8% | 0,010 | 0,030 | 0,030 | 0,020 | 0,020 | 0,005 |
| Enlucido de cemento Dif.* | 272,50 | 9,8% | 0,010 | 0,030 | 0,030 | 0,020 | 0,020 | 0,005 |
| Pavimento cerámico | 710,41 | 25,4% | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| Vidrio grande (6 mm) | 50,90 | 1,8% | 0,180 | 0,060 | 0,040 | 0,030 | 0,020 | 0,018 |
| Madera Sólida (5 cm) | 17,60 | 0,6% | 0,010 | 0,050 | 0,050 | 0,040 | 0,040 | 0,040 |
| Mármol | 8,80 | 0,3% | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,020 | 0,020 |
| Sup. de cierre | 312,30 | 11,2% | 0,900 | 0,900 | 0,900 | 0,900 | 0,900 | 0,900 |

**Material calibrado para la validación del modelo*

**Tabla 1.** Características de los materiales utilizados en la simulación.

El coeficiente de dispersión de todos los materiales fue el que predetermina el software que tiene un valor de 0,05 (Método Lambert) [18].

Con esta simulación como base (Sim_B), se realizaron posteriormente 4 más. La primera de ellas (Sim_00) se modificó el tipo de material de las bóvedas del pasillo perimetral, de “normal” a “fractional” [18], donde el software compensa automáticamente la difusión de estas superficies que se han tenido que fraccionar en diferentes planos para poder simular su geometría. El resto de simulaciones solamente se modificó el coeficiente de difusión del “Enlucido de cemento” de las zonas donde por la decoración la superficie es más irregular,

"Enlucido de cemento Dif". Se le dieron unos valores a estas superficies del coeficiente de difusión de 0,3 (Sim_01), 0,5 (Sim_02), y 0,8 (Sim_01) respectivamente.

## RESULTADOS

Tras realizar las simulaciones los valores obtenidos de los diferentes parámetros de la caracterización acústica del claustro se pueden observar en la Tabla 2.

| Simulación | Parametros | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Coef. Dif. | Rtmid | BR | Br | EDT | C80 | LF |
| Medición in situ | - | 2,22 | 1,08 | 0,87 | 2,19 | -1,58 | 32% |
| Sim_B | 0,050 | 2,30 | 1,10 | 0,86 | 2,23 | -3,23 | 28% |
| Sim_00 | 0,050 | 2,26 | 1,08 | 0,86 | 2,18 | -0,73 | 28% |
| Sim_01 | 0,300 | 2,20 | 1,08 | 0,87 | 2,17 | -0,77 | 28% |
| Sim_02 | 0,500 | 2,25 | 1,10 | 0,86 | 2,18 | -0,83 | 28% |
| Sim_03 | 0,800 | 2,21 | 1,08 | 0,87 | 2,15 | -0,93 | 28% |

**Tabla 2.** Valores de los parámetros acústicos en la medición in situ y las diferentes simulaciones.

En la Fig. 4 se muestra la diferencia entre Sim_B y Sim_00 al aplicar el cambio del tipo de material (de "normal" a "fractional") en las superficies que forman la geometría de las bóvedas. El efecto que provoca es bajar tanto el $T_{30}$ como el EDT de cada una de las octavas, y en este caso, que la curva tonal de la simulación este más cerca de la curva tonal real, obtenida con la medición in situ. Hay que destacar que el efecto que causa en los resultados de la simulación son reducidos, ya que en los dos casos se encuentran dentro de los márgenes que marcan las JND.




**Figura 4**. Influencia del cambio del tipo de material en las bóvedas en el ajuste del modelo

Respecto al parámetro energético $C_{80}$, observamos que las influencias son parecidas a los parámetros temporales. Se consigue que los valores se acerquen más a los reales reduciendo estos en todas las octavas de manera uniforme (Fig. 5). En relación al parámetro espacial LF, no se muestra ninguna influencia apreciable.

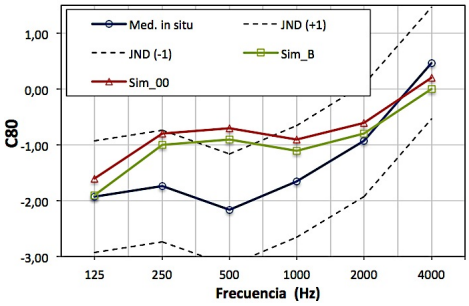



**Figura 5**. Influencia en el $C_{80}$ del cambio de tipo de material en bóvedas

En lo que corresponde a la influencia de los coeficientes de difusión se ha comprobado que es mínima. Se puede observar con detalle en la Tabla 3 donde se expone el valor del $T_{30}$ para cada una de las octavas. Hay que resaltar que las superficies que se han considerado más difusas por la decoración de las mismas (molduras, capiteles y arcos) suponen un 9,8% de la superficie total del modelo.

| Simulación | T30 | | | | | | Parametros | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | Rtmid | BR | Br |
| Med. in situ | 2,57 | 2,26 | 2,22 | 2,24 | 2,10 | 1,78 | 2,23 | 1,08 | 0,87 |
| Sim_B | 2,72 | 2,32 | 2,28 | 2,32 | 2,15 | 1,82 | 2,30 | 1,10 | 0,86 |
| Sim_00 | 2,61 | 2,26 | 2,23 | 2,28 | 2,1 | 1,79 | 2,26 | 1,08 | 0,86 |
| Sim_01 | 2,54 | 2,21 | 2,18 | 2,21 | 2,07 | 1,77 | 2,20 | 1,08 | 0,87 |
| Sim_02 | 2,68 | 2,25 | 2,23 | 2,26 | 2,1 | 1,77 | 2,25 | 1,10 | 0,86 |
| Sim_03 | 2,55 | 2,22 | 2,19 | 2,22 | 2,06 | 1,78 | 2,21 | 1,08 | 0,87 |

**Tabla 3.** Valores de $T_{30}$, $RT_{mid}$, BR y Br en la medición in situ y las diferentes simulaciones.

Todos los valores obtenidos están dentro del rango que nos marca las JND (5%). Las variaciones obtenidas para los valores del EDT son muy parecidas, y igualmente están dentro del 5%.

Por último, nombrar que respecto al parámetro energético del $C_{80}$, y del espacial LF el cambio de la difusión en dichas superficies no ha modificado los valores medios obtenidos en las diferentes simulaciones. Solamente destacar, que la influencia de estos coeficientes, si observamos los valores del $C_{80}$ por receptores individuales, es notablemente mayor en los situados en el interior del pasillo perimetral, que los situados en el exterior disminuyendo el valor de este parámetro (Fig. 6).

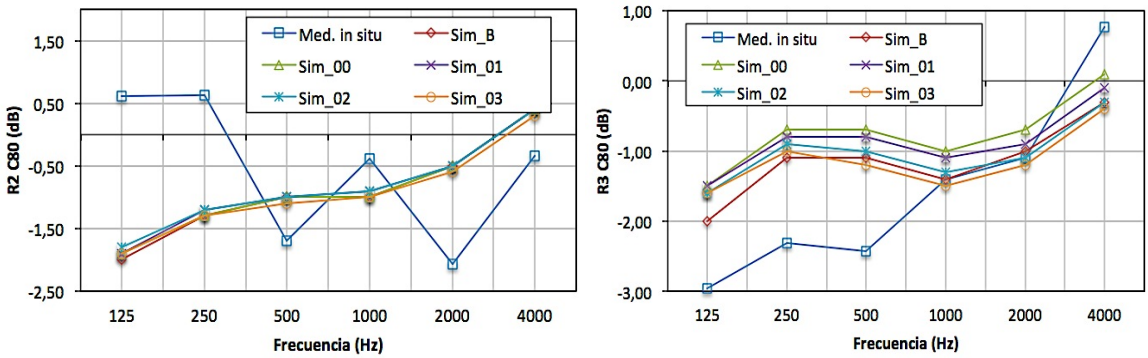



**Figura 6**. $C_{80}$ de los recptores R 2 (interior) y R 3 (exterior)

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la influencia de la difusión en la simulación del claustro del "Monestir del Corpus Christi" en la localidad de Llutxent (Valencia). Tras validar el modelo ajustando los coeficientes de absorción de uno de los materiales por un proceso iterativo comparándolo con los datos del $T_{30}$ obtenidos en la medición in situ del recinto, se pasó al estudio de la difusión desde dos puntos de vista. Se ha discutido el peso de la representación geométrica de las bóvedas de los pasillos perimetrales del claustro, donde se ha percibido que se mejora el comportamiento del modelo aplicando en estas superficies el tipo de material como "fractional" que ofrece el software utilizado, al tener que utilizar una gran cantidad de planos de pequeño tamaño para representar la geometría curva. Por último, respecto a la modificación de los coeficientes de difusión en las superficies irregulares, donde en este caso suponen un 9,8% del total, se ha observado que la influencia en los parámetros temporales es escasa, solo es notable en algunas frecuencias en EDT cuando el coeficiente de difusión ha sido del 0,8. En lo que a los parámetros energéticos y espaciales se refiere, la influencia ha sido menor, pudiéndose despreciar el efecto de los mismos en este caso.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Michael Vorländer. *Computer simulations in room acoustic: Concepts and uncertainties*. Journal of the Acoustical Society of America, 133 (3), p: 1203-1213 March 2013.

[2] Llinares, J.; Llopis, A.; Sancho, J. (1993). *Adecuación de la reverberación de una iglesia para su uso como sala de recitales.* Tecniacustica. Valladolid 1993

[3] Llopis Reyna, Ana; Serrano Rodrigo, Pau; Guillen Guillamón, Ignacio; Gómez Lozano, Vicente. *Ajustes por técnicas de ray tracing de un modelo virtual de la intervención acústica en la iglesia del Monasterio de Santa María de la Valldigna*. Tecniacustica. Valladolid 2013

[4] Miguel Galindo, Teofilo Zamarreño, Sara Giron. *Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results.* Journal of the Acoustical Society of America, 117 (5), p: 2873-2888 May 2005

[5] Teofilo Zamarreño, Sara Giron, Miguel Galindo. *Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches.* Journal of the Acoustical Society of America, 121 (1), p: 234-250 January 2007

[6] Sara Giron, Miguel Galindo, Teofilo Zamarreño. *Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches*. Journal of Sound and Vibration 315, p:1125-1142 March 2008

[7] Miguel Galindo, Teofilo Zamarreño, Sara Giron. *Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches*. Journal of the Acoustical Society of America, 126 (3), p: 1207-1218 September 2009

[8] Lidia Álvarez, Teofilo Zamarreño, Sara Giron, Miguel Galindo. *A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cthedrakls: Application to the Cathedral of Malaga*. Building and Environment 72 (2014) 102-115

[9] E. Cirillo, F. Martellotta. *An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches.* Applied Acoustics 64 (2003) 1-23

[10] Krzysztof Kosala, Zbigniew Wiltold. *Assessing the acoustic properties of Roman catholic churches: Anew approach.* Applied Acoustics 74 (2013) 1144-1152

[11] Rindel JH. *Roman Theatres and Revival of Their Acoustics in the ERATO Project.* Acta acustica united with acustica 99 (2013) 21-29

[12] Gino Iannace, Luigi Maffei, Patrizia Trematerra. The acoustic evolution of the large theatre of pompeii. The Acoustics of Ancient theatres Conference 2011

[13] Stamis Vassilantonopoulos, Panagiotis Hatziantoniou, Niclolas-Alexander Ttlas. *Measurements and analysis of the acoustics of the ancient theatre of Epidaurus.* The Acoustics of Ancient theatres Conference 2011

[14] K. Chourmouziadou, J. Kang. *Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres.* Applied Acoustics 69 (2008) 514-529

[15] A. Álvarez-Corbacho, T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón. *Acústica virtual del teatro romano de Itálica*. Tecniacúsica Murcia 2014.

[16] UNE-EN_ISO_3382-1. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos.

[17] Carrion, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Catalunya: Edicions UPC.

[18] ODEON Room Acoustic Software. (2009). User manual.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# OPTIMIZATION OF SOUND DIFFUSERS BASED ON SONIC CRYSTALS

PACS: 43.55.+p, 43.55 Br, 43.55 Ka

J. Redondo[(1)(*)], J. V. Sánchez-Pérez[(1)], X. Blasco[(1)], J. M. Herrero[(1)] & M. Vörlander[(2)]
[(1)] Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N, 46022 Valencia, Spain
[(2)] Institute of Technical Acoustics - RWTH Aachen University. Neustr. 50, 52066 Aachen, Germany
(*) fredondo@fis.upv.es

## ABSTRACT

Since the invention of sound diffusers four decades ago, several alternatives have been suggested. Sonic crystals have been demonstrated to be good candidates to substitute conventional diffusers in order to overcome the need for extremely deep structures when low frequencies have to be scattered. In this work, we explore the possibility of optimizing such structures providing better performance over a large frequency range. For doing so, evolutionary algorithms have been used in combination with Finite-Difference Time-Domain (FDTD) algorithms that allow predicting the performance of a sound diffuser. Preliminary results show that diffusion can be significantly increased.

## RESUMEN

Desde la invención de los difusores de sonido hace cuatro décadas se han sugerido varias alternativas. Recientemente se ha demostrado que los cristales de sonido son buenos candidatos a sustituir los difusores convencionales para evitar la necesidad de estructuras muy profundas si se quiere que sean eficaces a baja frecuencia. En este trabajo exploramos la posibilidad de optimizar este tipo de estructuras mejorando el rendimiento en baja frecuencia. Para ello, se combinan algoritmos evolutivos con Finite-Difference Time-Domain (FDTD) que permite predecir el rendimiento de un difusor de sonido. Los resultados preliminares muestran que la difusión puede ser significativamente aumentada.

## INTRODUCCIÓN

Desde la invención de los difusores hace ya 40 años [1] se ha demostrado su capacidad para mejorar la difusividad, la eliminación de ecos flutter y la reducción de la coloración [2] en acústica de salas. En los últimos años, varios autores han sugerido diversas variantes al diseño original de Schroeder. Recientemente [3] se ha propuesto la utilización de cristales de sonido como difusores, lo que permite una difusión eficiente a bajas frecuencias con un espesor reducido comparado con los difusores tradicionales.

Por otra parte, los algoritmos evolutivos han sido utilizados para diseñar dispositivos basados en cristales de sonido, fundamentalmente encaminados a obtener pantallas de sonido [4-6]. En estos trabajos la optimización se ha realizado utilizando un algoritmo genético multiobjetivo para conseguir la máxima atenuación posible en un rango de frecuencias predeterminado. La aplicación de estos algoritmos evolutivos a los difusores de sonido ya ha sido ya explorada por varios autores desde finales del siglo XX, pero utilizando algoritmos monoobjetivo. En 1995

Cox [7] sugirió el uso de métodos iterativos tales como “downhill simplex” y métodos tipo “Newton” para optimizar difusores de fase. También se han utilizado técnicas de optimización para diseñar difusores comerciales basados en superficies curvas [8]. Finalmente, los difusores volumétricos basados en cristales de sonido han sido diseñados mediante optimización mono-objetivo [9], utilizando la creación de vacantes en el cristal que conforma el difusor.

Como conclusión, se puede afirmar que los algoritmos evolutivos multiobjetivo no han sido utilizados nunca en el campo de los difusores acústicos, tanto en el caso de difusores de fase, como en el de difusores basados en cristales de sonido. El propósito del presente trabajo es explorar la aplicabilidad de este tipo de optimización tomando como base los difusores basados en cristales de sonido propuestos por Redondo et al [3]. Pretendemos crear dispositivos de una profundidad reducida que trabajen en el rango de bajas frecuencias (bandas de octava de 125Hz y 250Hz).

## DESCRIPCION DEL PROCESO DE OPTIMIZACION

La estructura de partida que se pretende optimizar está formada por un conjunto de 45x4 dispersores cilíndricos de radio 3.5cm, organizados en una red cuadrada con cuatro zonas de diferente parámetro de red (Figura 1.a). En dos de ellas, el parámetro de red a=8.8cm, y en las otras dos, a=7.2cm. en la Figura 1.b se muestra el incremento del valor del coeficiente de difusión de este difusor comparado con uno de residuo cuadrático QR en el rango de bajas frecuencias.

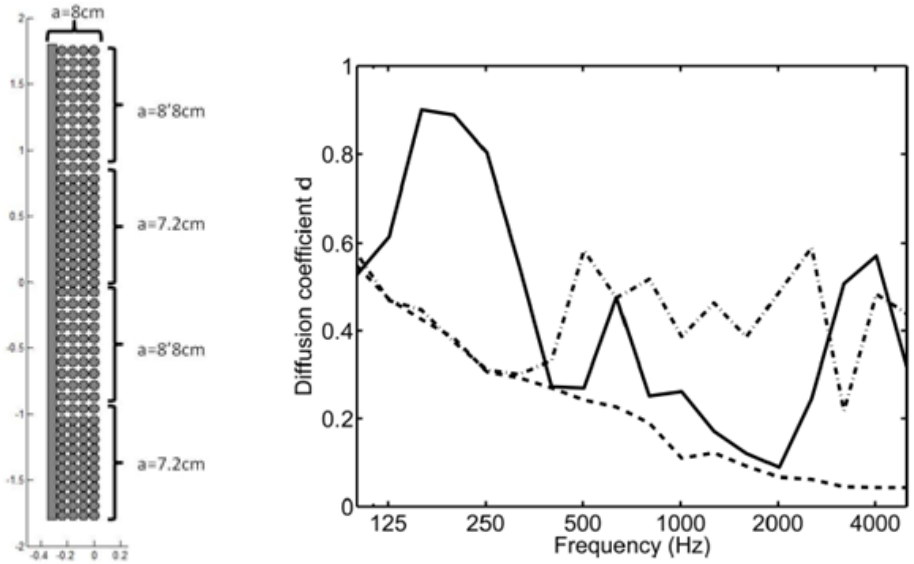
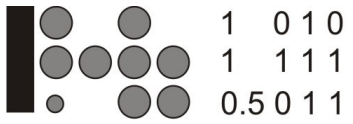



Figura 1. (a) Configuración esquemática del difusor bi-periódico basado en cristales de sonido. (b) Coeficiente de difusión frente a frecuencia: línea continua Cristal de sonido; línea discontinua, difusor de residuo cuadrático (QR) con dimensiones similares; Línea en punteada superficie plana de la misma anchura (referencia)

El primer paso para la optimización multiobjetivo realizada consiste en establecer una codificación genética para el difusor. Los individuos se codificarán mediante una serie de genes que representan el conjunto de los radios normalizados de los cilindros que conforman el cristal. Se han elegido 6 posibles valores entre 0 y 1 con pasos de 0.2. El valor 0 representa la ausencia de cilindro, mientras que el valor 1 representa el radio máximo que puede tomar un cilindro, que es igual a la mitad del parámetro de red, a. De este modo cada individuo viene dado por un genotipo que consiste en un vector de 180 elementos, igual al número de cilindros

que constituyen el cristal, variando entre 0 y 1. La Figura 2 ilustra un ejemplo del proceso de codificación del difusor.




$\theta$ =(1, 0 ,1, 0, 1, 1, 1, 1, 0.5, 0, 1, 1)

Figura 2. Ejemplo de codificación genética de un difusor basado en cristales de sonido

El siguiente paso consiste en cuantificar la idoneidad de un individuo para actuar como difusor. En este caso, se considera que la eficiencia viene dada por el valor de su coeficiente de difusión normalizado: a mayor valor de este coeficiente, más idóneo resulta el individuo. Para determinar el valor de este coeficiente se seguirá el método establecido por la norma ISO [10] para la caracterización de difusores en condiciones controladas (cámara anecoica). El esquema de medición dado por la norma es implementado en un programa de simulación basado en diferencias finitas en dominio temporal (FDTD) [11]. Mediante dicho algoritmo es posible obtener el coeficiente de difusión a partir de las mediciones de nivel de presión sonora en un semi-arco de circunferencia que rodea al difusor, mediante la siguiente expresión:

$$d'_j = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ij}^2\right)^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(p_{ij}^2\right)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^{n}\left(p_{ij}^2\right)^2} \qquad (1)$$

donde $d'_j$ es el coeficiente de difusión a la j-esima banda de tercio de octava considerada, $p_{ij}$ es la presión acústica del sonido reflejada en dicha banda, en la dirección i-esima, y n es el número de direcciones consideradas. Para normalizar el coeficiente entre 0 y 1 se compara con el valor obtenido para una superficie plana con la misma anchura. De este modo, el coeficiente de difusión normalizado, $d_j$, se define como:

$$d_j = \frac{d'_j - d_{j,ref}}{1 - d_{j,ref}} \qquad (2)$$

donde $d_{j,ref}$ es el coeficiente de difusión de la superficie plana de referencia en la banda j-esima.

A continuación se definen las Funciones de Costo (J) que se van a considerar para obtener individuos óptimos, es decir, hay que definir en qué sentido se pretende que los individuos sean óptimos. Tal y como ya se ha dicho anteriormente, el objetivo que se persigue en este trabajo consiste en diseñar estructuras basadas en cristales de sonido que sean eficientes en el rango de bajas frecuencias, dado que es para estas frecuencias donde los difusores convencionales son poco prácticos, ya que sería necesario que poseyeran una elevada profundidad para obtener una buena difusión. Por lo tanto, se trabajará en 6 bandas de tercio de octava (100Hz, 125Hz, 160Hz, 200Hz, 250Hz y 315 Hz) que definen el rango de bajas frecuencias. En adelante estas bandas se nombrarán correlativamente desde $d_1$ hasta $d_6$. En este trabajo se proponen un total de 5 funciones de costo. Es necesario hacer hincapié en que la elección de estas funciones de costo es totalmente arbitraria, y depende del objetivo final que se persiga. Así, el objetivo puede ser la eliminación de un problema existente en una banda muy concreta de frecuencias o por lo contrario, puede interesar cubrir todo el rango de frecuencias. Debido a que el algoritmo evolutivo multiobjectivo minimiza estas Funciones de Costo, el valor cero (0) será el óptimo en todos los casos.

La primera Función de Costo que se propone es la media de todos los 6 coeficientes de difusión normalizados pero invertida para que 0 corresponda al mejor caso. Esto es:

$$J_{low}(\theta) = 1 - \bar{d} = 1 - \sum_{j=1}^{m} \left| \frac{d_j(\theta)}{m} \right| \qquad \text{con m=6} \qquad (3)$$

La segunda Función de Costo es la desviación estándar, dado que se pretende que los difusores tengan una respuesta, en lo que se refiere a su coeficiente de difusión, tan plana como sea posible:

$$J_{varlow}(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} (\bar{d} - |d_j(\theta)|)^2}{m-1}} \qquad \text{con m=6} \qquad (4)$$

Se definen también dos Funciones de Costo adicionales para considerar la eficiencia de forma independiente de las dos bandas de octava involucradas. Se define como la media del valor del coeficiente de difusión de las 3 bandas de tercio de octava consideradas:

$$J_{125}(\theta) = 1 - \overline{d_{125}} = 1 - \sum_{j=1}^{3} \left| \frac{d_j(\theta)}{3} \right| \qquad (5)$$

$$J_{250}(\theta) = 1 - \overline{d_{250}} = 1 - \sum_{j=4}^{6} \left| \frac{d_j(\theta)}{3} \right| \qquad (6)$$

Finalmente, para ilustrar el caso en el que sea necesario aumentar la difusión en una banda concreta en bajas frecuencias vamos a elegir de manera arbitraria la banda de tercio de octava centrada en 100 Hz. De este modo definimos una última función de coste:

$$J_{100}(\theta) = 1 - d_1 \qquad (7)$$

En el proceso de optimización desarrollado se combinarán las Funciones de Costo de dos en dos, quedando así definidas tres parejas de Funciones: $J_{low}$ y $J_{varlow}$; $J_{125}$ y $J_{250}$; y finalmente $J_{low}$ and $J_{100}$.

El siguiente paso del proceso de optimización consiste en generar una población inicial de manera aleatoria. En esta población se evalúan las Funciones de Costo y se detecta el conjunto inicial de los individuos óptimos. Este conjunto se conoce como frente de Pareto. Los individuos óptimos son aquellos que son dominantes sobre el resto de la población, es decir, que no existe ningún otro individuo cuyos valores de cualquiera de las dos Funciones de Costo (J) consideradas en cada caso sean menores (Figura 3).

A continuación comienza el proceso de optimización mediante el cruce de individuos. Se eligen aleatoriamente dos individuos de la población inicial y se combinan sus genes de manera aleatoria, tal y como en la naturaleza los hijos poseen aleatoriamente parte de la información genética de sus dos progenitores. Asimismo, con una cierta probabilidad, en general muy baja, se establecen mutaciones de individuos elegidos también al azar. Posteriormente se calculan los valores de las Funciones de Costo de los nuevos individuos así obtenidos. Para mantener el tamaño de la población durante todo el proceso, la aparición de nuevos individuos supone la eliminación de individuos anteriormente presentes en la población de entre aquellos que no

forman parte del frente de Pareto. Todo el proceso se repite un número finito de veces, o en otras palabras, un número de generaciones determinado.

En el presente trabajo se ha considerado una población inicial de 1000 individuos y se ha dejado evolucionar el sistema un número de generaciones del mismo orden. Cuando se observa que el frente de Pareto tiende a estabilizarse lo cual es un primer indicador de que el proceso se ha saturado y no se pueden encontrar soluciones aún mejores que las ya encontradas.

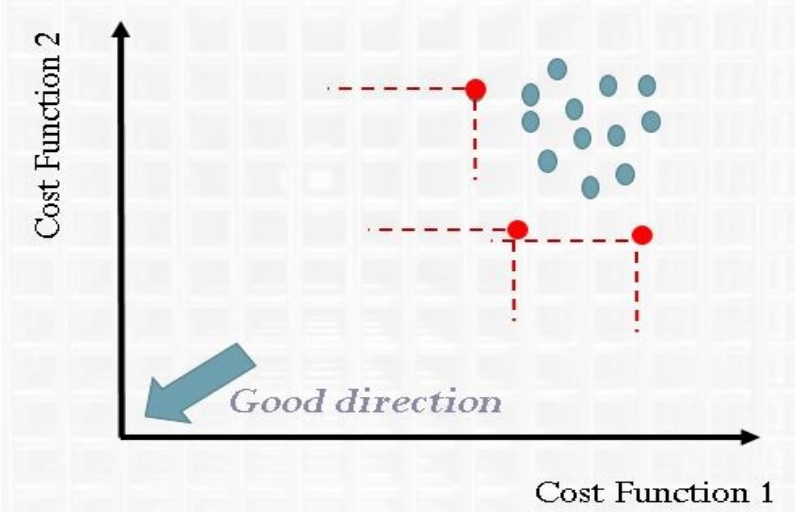



Figura 3. Representación del criterio de dominancia. Los individuos en rojo son dominantes, dado que no existe otro individuo que sea mejor para los dos criterios simultaneamente.

## RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

Como caso representativo se muestran en detalle tan solo los resultados obtenidos para la pareja $J_{low}$ y $J_{varlow}$. Los resultados se han representado en la Figura 4.

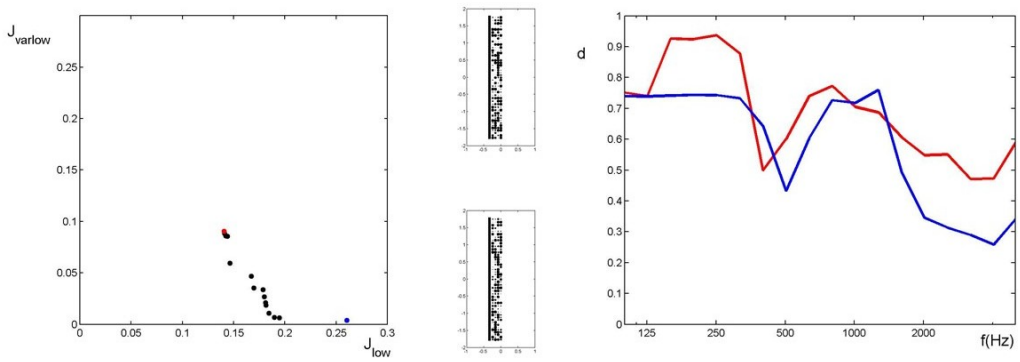



Figura 4. (a) Frente de Pareto final en el proceso de optimización; (b) los dos difusores optimizados con mejor valor de $J_{low}$ arriba (rojo)

$J_{varlow}$ arriba (azul); (c) coeficiente de difusión normalizado en función de la frecuencia para los dos individuos seleccionados en (b).

En la Figura 4.a se puede observar que los valores del coeficiente de difusión son muy elevados para todas las frecuencias dentro del rango de interés, ya que los valores de las Funciones de Costo son para los mejores individuos (pertenecientes al frente de Pareto), muy cercanos a cero. La Figura 4.b muestra como ejemplo la estructura final del cristal de sonido para los dos de los individuos del frente de Pareto que presentan el mayor valor de $J_{low}$ y $J_{varlow}$. En la Figura 4.c se ha representado el valor del coeficiente de difusión normalizado, d, en función de la frecuencia para los dos individuos seleccionados anteriormente. Se observa claramente para frecuencias más altas (fuera del rango de optimización) aparecen mínimos locales donde el difusor no será eficiente.

Con el propósito de ilustrar el resultado de la optimización para el resto de pares de Funciones de Costo consideradas, en la Figura 5 se muestran los frentes de Pareto finales obtenidos en los tres procesos de optimización, incluyendo en todos los casos como referencia tanto el panel plano como el difusor biperiódico (BPD) que ha sido el punto de partida de este trabajo. Es evidente que en todos los casos, los individuos pertenecientes a los distintos frentes de Pareto mejoran sensiblemente la eficiencia de la difusión acústica respecto a las referencias iniciales tomadas.

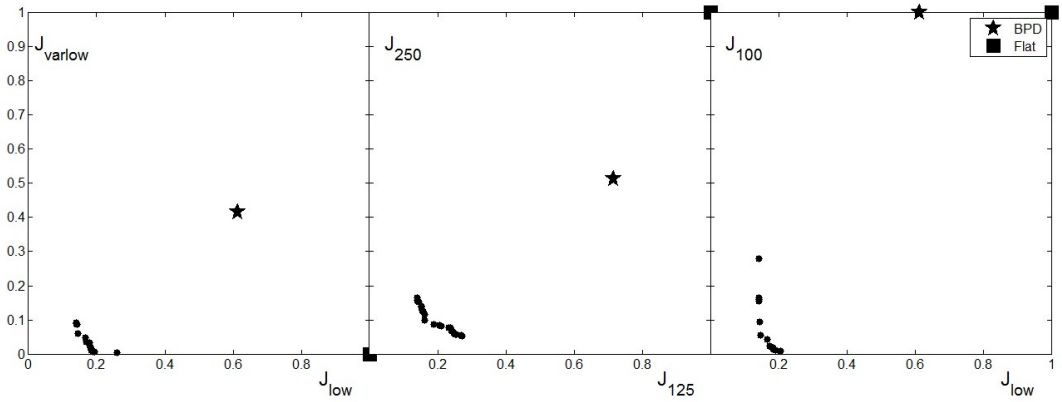



Figura 5. Frentes de Pareto de las tres parejas de funciones de coste consideradas. Como referencia se incluye el panel plano (Flat) y el difusor biperiódico no optimizado (BPD)

En el caso de la optimización con la pareja $J_{low}$ y $J_{varlow}$ cabe destacar que los valores de éste último son muy bajos para todos los individuos del frente, o en otras palabras, los coeficientes de difusión son muy parecidos en el rango de bajas frecuencias seleccionado. Por otra parte, el valor más bajo de $J_{low}$ está muy cerca de 0.1, que corresponde a un valor promedio del coeficiente de difusión normalizado de 0.9, que podemos calificar de excelente. En lo que se refiere a la optimización de la pareja de Funciones de Costo $J_{125}$ y $J_{250}$ se observa que los valores obtenidos para $J_{250}$ suelen ser mejores que los obtenidos para $J_{125}$, o en otras palabras, resulta más difícil obtener buenos resultados cuanto más baja sea la frecuencias considerada, tal y como cabía esperar. Finalmente, en el caso de la pareja $J_{low}$ y $J_{100}$ se muestra un comportamiento bastante singular. Es evidente que hay una mayor dispersión en los resultados para ésta última Función de Costo, lo cual es razonable dado que no se trata de una media de varias frecuencias. En general, en este último caso se puede decir que la mejora de uno de los parámetros de coste supone un deterioro del otro parámetro, si bien es cierto que este empeoramiento es mínimo.

## CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este trabajo se ha mostrado como los algoritmos evolutivos multiobjetivo pueden ser aplicables para la obtención de difusores basados en cristales de sonido más eficientes. La mejora de la difusión en los individuos finales es muy significativa para todas las funciones de coste consideradas en este trabajo. Además, se han definido tres parejas de Funciones de Costo, ilustrando dos objetivos bien diferenciados, como son la mejora general de la difusión en el rango de bajas frecuencias y su mejora particular de un rango frecuencial muy concreto.

En futuros trabajos se analizarán por una parte los criterios de selección entre los individuos "óptimos" y por otra el rendimiento de estas estructuras en campo confinado. En esta última línea ya se han iniciado una serie de experiencias evaluando parámetros objetivos y subjetivos que vengan a cuantificar el grado de mejora de la acústica de una sala producido por este tipo de estructuras.

## REFERENCIAS

[1] M.R. Schroeder, "Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences", J. Acoust. Soc. Am. 57, No. 1, 149-150 (1975).

[2] Cox T. J., D'Antonio P., "Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application". Second Edition, 290, Taylor&Francis, London and New York (2009).

[3] Redondo, J.; Picó Vila, R. ;Sánchez-Morcillo, V. ; Woszczyk, W "Sound diffusers based on sonic crystals". JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA.13 (44412 – 4412) 2013

[4] V. Romero-García, E. Fuster, L. M. García-Raffi, E. A. Sánchez-Pérez, M.Sopena, J. Llinares, and J. V. Sánchez-Pérez, "Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals", Appl. Phys. Lett. 88, 174104 (2006).

[5] V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. García-Raffi, J. M. Herrero, S. García-Nieto, and X. Blasco "Hole distribution in phononic crystals: Design and optimization" J. Acoust. Soc. Am. 125, 3774–3783 ( 2009).

[6] J. M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. Garcia-Raffi, "Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm", Struct. Multidisc. Optim., 39, 203–215 (2009)

[7] Cox T.J., The optimization of profiled diffusers, J. Acoust. Soc. Am., 97, 2928-2936 (1995).

[8] Cox T. J., "Designing curved diffusers for performance spaces", Audio Eng.Soc., 44(5), 354-364, (1996)

[9] R. J. Hughes, J. A. S. Angus, T. J. Cox, O. Umnova, G. A. Gehring, M.Pogson, and D. M. Whittaker, Volumetric diffusers: Pseudorandom cylinder arrays on a periodic lattice, J. Acoust. Soc. Am. 128, 2847 (2010).

[10] ISO 17497-2:2012. Acoustics: Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field.

[11] J. Redondo, R. Picó, B. Roig and M. R. Avis, Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes, Acta Acustica united with Acustica 93, 4, 611-622, (2007)

# ESTUDIO ACÚSTICO DEL PALAU DE LA MÚSICA DE VALENCIA

PACS: 43.55.-n
Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J. I.
Deptº de Física Aplicada – ETS de Arquitectura de Valladolid (España)
e-mail: gvallejortega@yahoo.es; jignacio@arq.uva.es

**ABSTRACT**

This work presents the conclusions of the acoustic study made in the Palau de la Música, located in the city of Valencia (Spain). The auditorium was built by the Spanish Architect José María García de Paredes in 1987. The acoustics of the hall were analyzed according to the final outcome when the hall was inaugurated. The following points have been noted:

• Description of construction project, in which the influence of the acoustic consultant Lothar Cremer and the contribution of the firm García BBM are present.
• Explanation of the acoustic simulation results: sound rays trajectories from the source to the receivers have been analyzed and acoustic parameters have been evaluated.
• Acoustic measurements: the results are compared with those from the acoustic simulation.

**RESUMEN**

Este trabajo presenta las conclusiones del estudio acústico realizado en el Palau de la Música de Valencia (España). Este auditorio fue construido por el arquitecto José María García de Paredes en 1987. La acústica de la sala es analizada según fue proyectada en su inauguración, sin tener en cuenta posteriores modificaciones. El trabajo trata los siguientes puntos:

• Descripción del proyecto de construcción, en el que están presentes la influencia del consultor acústico Lothar Cremer y la intervención de la empresa consultora García BBM.
• Simulación acústica con el software CATT Acoustic, abarcando un análisis geométrico de las trayectorias de rayos fuente-receptor y una evaluación de los parámetros acústicos.
• Mediciones acústicas: los resultados son comparados con los de la simulación.

## 1. PALAU DE LA MÚSICA DE VALENCIA

### 1.1 El arquitecto

José María García de Paredes nació en Sevilla en 1924 y murió en Madrid en 1990. Arquitecto por la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid (1950). Dentro de su producción, los auditorios constituyen un cuerpo propio de singular importancia. Junto con el Palau de la Música, proyectó y construyó más de una docena de grandes auditorios, destacando el Auditorio Nacional de Música (Madrid, 1988) y el Auditorio Manuel de Falla (Granada, 1978 y 1987).

### 1.2 La construcción

En 1984 el Ministerio de Cultura encargó a García de Paredes el proyecto para la construcción del Palau de la Música. La construcción dio comienzo al año siguiente, inaugurándose en 1987. El edificio se emplaza en la prolongación del Paseo de la Alameda y se asoma sobre el antiguo cauce del río Turia. En su interior el Palau alberga un conjunto instalaciones entre las que destacan dos salas de concierto superpuestas: la sala sinfónica (1794 localidades), que será objeto de nuestro estudio, y la sala de música de cámara (420 localidades).

## 2. ESTUDIO ACÚSTICO DEL AUDITORIO[1]

### 2.1 Descripción general de la sala: dimensionado y aforo

La sala sinfónica del Palau tenía en 1987 una capacidad de **1794 localidades**, considerando la ocupación de los bancos del coro. Su volumen es de unos **15.700 m$^3$**, derivándose un **volumen por persona de 8,8 m$^3$**. La sala es simétrica a lo largo de su eje longitudinal. Su geometría puede ser inscrita en un rectángulo de 47 m x 31 m de anchura, si bien con unas dimensiones que crecen orgánicamente hacia arriba, como muestran los planos de las figura 1.

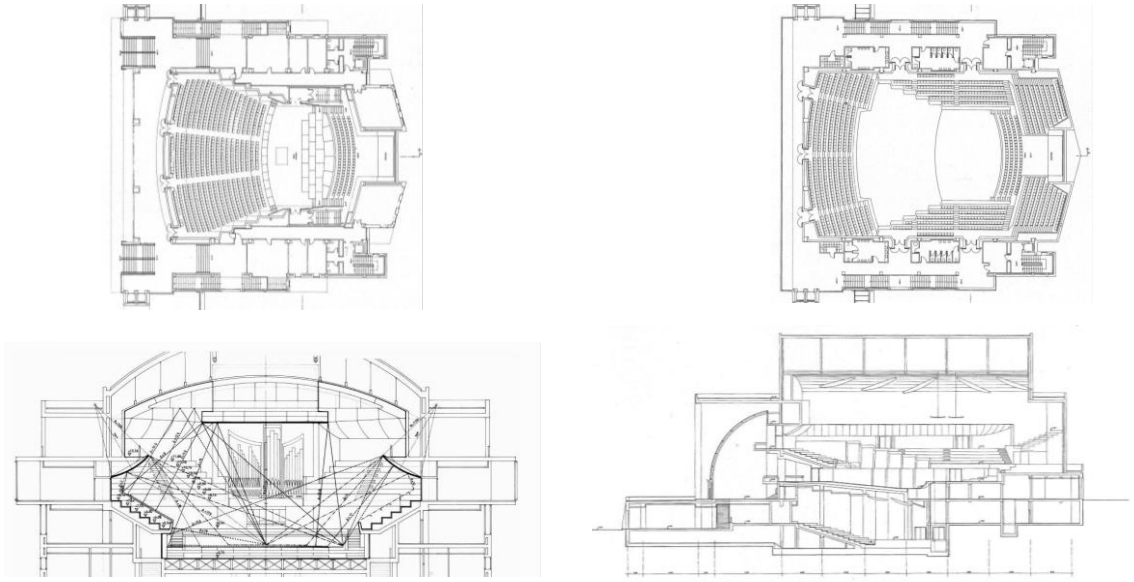


*Figura 1.- Planos del Palau de la Música: cotas 2,89 y 8,33; sección transversal y sección longitudinal*

La figura 2 muestra el interior de la sala. La organización del espacio responde a un cuidadoso reparto del público en las distintas zonas de audiencia:



*Figura 2.- Interior de la sala sinfónica del Palau*

### 2.2 El asesoramiento acústico del Palau

Para la acústica del Palau, García de Paredes contó con la colaboración de la consultora García BBM, que también intervino en el Auditorio Nacional de Madrid junto con Lothar Cremer. En Madrid el papel de García BBM se centró en la realización de mediciones acústicas en las distintas salas y medidas de la absorción de las butacas, así como en la construcción de la maqueta. En el Palau el asesoramiento de García BBM se extiende a la fase de proyecto.

No tenemos constancia de la participación directa de Lothar Cremer en el asesoramiento del Palau. Sin embargo, debemos recordar la relación del Auditorio Nacional con la Philarmonie de Berlín, ambas asesoradas por Cremer. Pero, sobre todo, debemos poner de manifiesto el paralelismo entre el Auditorio Nacional y el Palau, que se justifica en las siguientes imágenes:

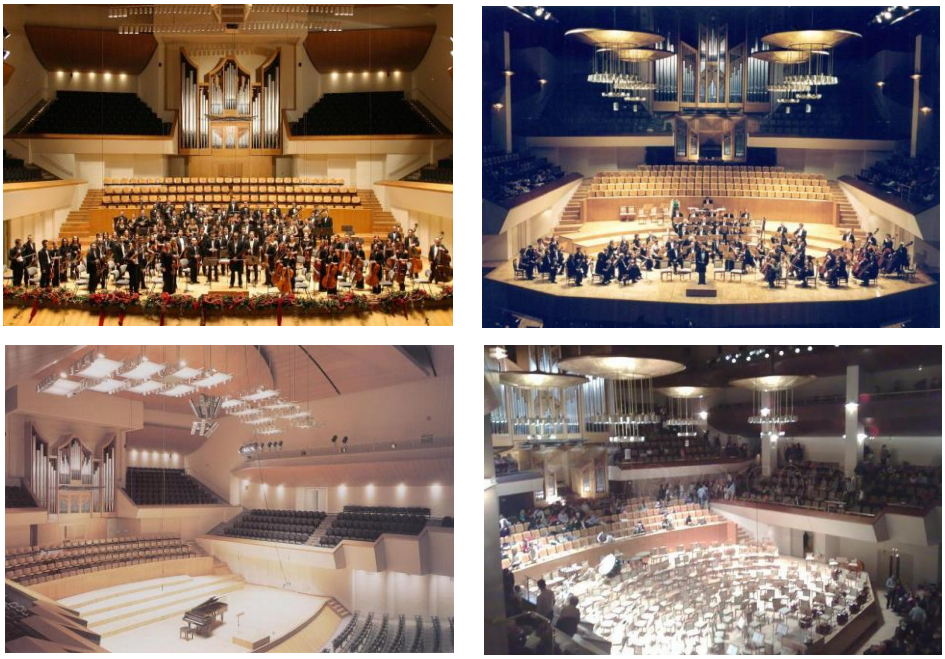


*Figura 3.- Comparación entre diferentes zonas del Palau (izda) y del Auditorio Nacional (dcha)*

Las diferencias más significativas entre los dos auditorios son que el Palau tiene un piso menos y un diseño diferente del techo, con una envolvente exterior cóncava y cinco paneles reflectantes convexos. Por lo demás, la similitud de diseño en el patio de butacas, los bancos del coro y todo el primer piso es extraordinaria. Ambas salas se construyeron simultáneamente. El Palau, aunque fue inaugurado un año antes, comenzó su construcción en 1985 y en ese año Lothar Cremer ya había enviado los dos informes más determinantes para el asesoramiento del Auditorio Nacional[2]. Por tanto, los requerimientos dados en los informes para la sala de Madrid sirvieron sin duda también para las partes comunes del Palau. Fueron los siguientes:

- Posición de los reflectores sobre el escenario para reforzar el sonido en esa zona y evitar ecos desde el techo.
- Evitar las paredes paralelas en el escenario para impedir la existencia de ecos flotantes
- Inclinación de las balaustradas de los anfiteatros, las galerías laterales y los balcones detrás de la orquesta para dar reflexiones a la audiencia del patio de butacas.
- Curvatura de los paneles del techo de las galerías laterales y de los balcones detrás de la orquesta para dar reflexiones al público de esas zonas (Fig. 1 sección transversal, ver trazada de rayos para el estudio de reflexiones en el techo de la galería lateral).
- Colocación de material difusor en las paredes traseras del patio de butacas, del primer anfiteatro y de los asientos del coro para evitar ecos en zonas lejanas.

El asesoramiento de García BBM se plasma en un informe enviado al arquitecto[3]. Dado que el informe recoge las recomendaciones derivadas de los resultados de las mediciones acústicas, reseñaremos estas recomendaciones en el apartado 2.5 referente a mediciones.

### 2.3 Modelización y materiales

Para la simulación se ha construido un modelo acústico (Fig. 4) partiendo de un dibujo de la sala en tres dimensiones, que nos caracteriza su geometría, usando el programa AUTOCAD y operando seguidamente con el programa CATT Acoustic. Se han obtenido un total de 1197 caras 3D y un 0,1 % de rayos escapados, lográndose así un cierre prácticamente completo del recinto. El software marca la realización de ciertas adaptaciones para el proceso de simulación:

- Los trazos curvos **de la envolvente exterior y de los paneles reflectantes del techo** se descompusieron en trazos rectos, ya que el programa no admite líneas curvas.

- El **público** ha sido modelizado por **cajas** de 80 cm de altura. Se han incluido como cajas de público algunas escaleras que separaban una zona de audiencia de una pared o dos zonas de audiencia. Así, el área de audiencia ocupa una superficie de 1039 $m^2$.

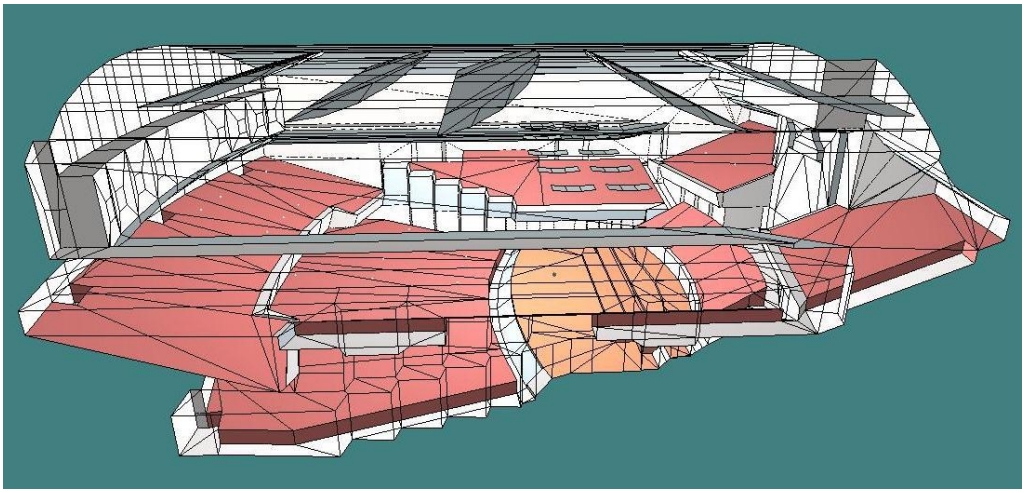


*Figura 4. - Modelización de la sala*

La finalidad de este auditorio fue para conciertos de música sinfónica, música de cámara y recitales, incluso para congresos. La elección de los materiales obedeció al intento de conseguir un tiempo de reverberación adecuado; según el informe de García BBM[3], el tiempo de reverberación buscado fue 1,9 s para las frecuencias medias. Por la experiencia aportada en un gran número de simulaciones y debido a la complejidad de la geometría de esta sala, se ha decidido **dar a los materiales reflectantes una difusión por defecto del 18%** para todas las bandas de frecuencia. La Tabla 1 muestra los materiales con su absorción y difusión por metro cuadrado en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz[4]:

| MATERIALES | ABSORCIÓN | DIFUSIÓN |
|---|---|---|
| Madera pegada para el suelo del escenario, pasillos y apoyabrazos de antepechos | 4 4 7 6 6 7 | 18 18 18 18 18 18 |
| Madera pegada difusora para todas las escaleras | 4 4 7 6 6 7 | 50 50 50 50 50 50 |
| Madera con cámara de aire para los paneles de los techos | 19 14 9 6 6 5 | 18 18 18 18 18 18 |
| Madera con cámara de aire difusora para el órgano | 19 14 9 6 6 5 | 30 40 50 60 70 70 |
| Ladrillo macizo enfoscado para paredes y antepechos del primer anfiteatro | 2 2 3 4 5 5 | 18 18 18 18 18 18 |
| Acabado enfoscado con cámara de aire para los antepechos de las tribunas laterales | 20 15 10 8 4 2 | 18 18 18 18 18 18 |
| Vidrio para los cristales de las cabinas | 2 6 3 3 2 2 | 18 18 18 18 18 18 |
| Vidrio difusor para las lámparas | 18 6 4 3 2 2 | 30 40 50 60 70 70 |
| Zona de público: sillas Castelli (entre paréntesis absorción de las sillas vacías)[5] | 15 34 70 74 82 65 (6 11 29 36 44 44) | 30 40 50 60 70 70 |
| Escenario con músicos (densidad de ocupación: 0,72 personas / $m^2$) | 10 21 41 65 75 71 | 30 40 50 60 70 70 |
| Hierro para las puertas del escenario | 2 3 3 4 2 3 | 18 18 18 18 18 18 |
| Madera sobre soporte metálico para las puertas de acceso del público | 2 3 3 4 2 3 | 18 18 18 18 18 18 |

Tabla 1.- Materiales con su absorción y difusión en las bandas de octava

### 2.4 Simulación acústica

Supondremos una fuente omnidireccional A0 centrada en el ancho del escenario, a 3 m del borde y 1,5 m de altura sobre el mismo, que emite un nivel de presión sonora de 90 dB a 1 m de distancia en todas las bandas de octava (125 Hz, 250 Hz , 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz). Se han colocado 40 receptores a un lado del plano de simetría xz, distribuidos en el patio de butacas, primera planta (primer anfiteatro, tribuna lateral y tribuna detrás del escenario) y bancos del coro, como se muestra en la figura 5. Los cálculos se han realizado en sala ocupada, salvo indicación. Los datos proporcionados por la simulación los clasificaremos en dos apartados:

- Análisis geométrico: trayectorias de rayos sonoros fuente-receptor.
- Resultados de los parámetros acústicos: SPL, G, RT, BR, Br, $C_{80}$, LF y RASTI

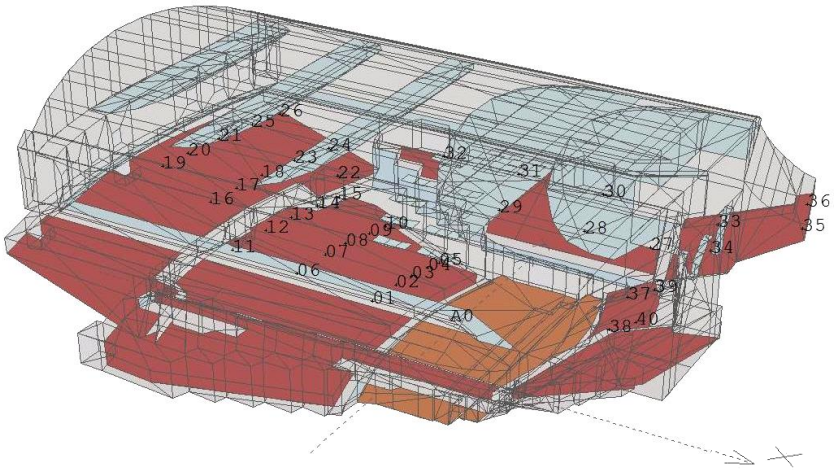


*Figura 5.- Posición de fuente y receptores en el área de audiencia*

### 2.4.1 Análisis geométrico: resultados por receptor

Se han analizado las trayectorias de los rayos de emisión desde la fuente a los receptores, considerando las reflexiones de orden menor o igual que tres. Para cada receptor se ha estudiado la continuidad de las reflexiones, su procedencia, el reparto temporal y la secuencia de intensidades, asegurándonos de la ausencia de ecos; se ha examinado el cambio de los ecogramas entre receptor y receptor a lo largo de las direcciones axiales de la sala. Las conclusiones son:

- El **número de reflexiones** en las distintas partes de la sala es desigual, siendo la zona más beneficiada el patio de butacas. El resto de las zonas recibe menos reflexiones y con un reparto desigual dependiendo de receptores. En cualquier caso, el nivel sonoro SPL se sitúa en todos los receptores por encima de 69 dB en todas las bandas de frecuencia.
- En cuanto a la **proveniencia de las reflexiones**, se detecta una gran participación de las paredes y los antepechos en las reflexiones del patio de butacas, de idéntico modo que en el Auditorio Nacional, lo que evidencia el paralelismo entre estas salas. El techo, sobre todo los cinco paneles convexos, interviene en reflexiones directas captadas por todos los receptores de la zona central del primer anfiteatro, destacando también las que se reciben en la parte delantera de la tribuna lateral, tribuna trasera y patio de butacas (8 de los 15 receptores), disminuyendo su efectividad en los bancos del coro y en el lateral del primer anfiteatro. Los paneles curvos de los techos de las tribunas laterales, primer anfiteatro y tribunas traseras participan, solos o en colaboración sobre todo con las paredes, en las reflexiones en las localidades situadas en esas zonas, cumpliendo allí su cometido. No obstante, hay que resaltar que los receptores situados detrás en la tribuna lateral (30, 31 y 32) no reciben reflexiones de primer orden, que seguramente sí habrían recibido dando una inclinación a estos paneles 6º mayor, como estaba inicialmente previsto en los planos.
- Las **lámparas** tienen escasa participación debido a su pequeño tamaño. No se han detectado reflexiones directas provenientes de ellas y han sido muy escasas las reflexiones en combinación con otras superficies en zonas próximas al escenario, como las primeras filas del patio de butacas, las tribunas laterales o los bancos del coro. Teniendo en cuenta la altura del techo, podría haber desfases superiores a 27 m entre el camino recorrido por el sonido directo y el sonido reflejado sobre el escenario.
- Se detecta un **posible eco en el receptor 35 de la tribuna trasera** por la captación de ocho reflexiones de segundo y tercer orden procedentes de la pared y cristal de las cabinas, del segundo panel del techo y de las paredes trasera y lateral de la propia tribuna (Fig.6).

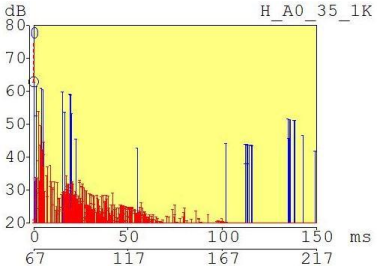



*Figura 6.- Ecograma del rec 35*

### 2.4.2 Resultados de los parámetros acústicos

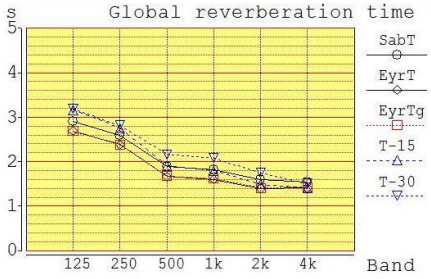
- *Nivel de presión sonora SPL y Fuerza sonora G*

El valor promedio del nivel de presión sonora SPL para los receptores supera los 72 dB en todas las frecuencias. Los valores SPL resultan diferentes según la zona del auditorio que tratemos, siendo más elevados en el patio de butacas, bancos de coro y tribunas laterales del primer piso. Las tribunas traseras y, sobre todo, el primer anfiteatro registran los valores más bajos que, en cualquier caso, están **por encima de los 69 dB para todas las bandas de frecuencia** en los receptores de esas zonas. Esto es un buen resultado que garantiza un reparto satisfactorio del sonido en toda la sala.

El promedio de la fuerza sonora G en sala vacía para los receptores en las frecuencias medias es $\mathbf{G_{mid}}$ **= 7,4 dB**, situándose por encima de lo recomendado por la bibliografía[6].

- *Tiempo de reverberación RT*

La figura 7 muestra tabla y gráficas de los distintos valores del tiempo de reverberación, unos obtenidos mediante su fórmula (Sabine y Eyring), otros calculados a partir de la geometría de la sala con sus superficies de revestimiento, como los del T-15 y T-30.




| | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EyrT | 2,69 | 2,38 | 1,67 | 1,60 | 1,39 | 1,41 | s |
| EyrTg | 2,69 | 2,39 | 1,68 | 1,62 | 1,41 | 1,43 | s |
| SabT | 2,91 | 2,60 | 1,88 | 1,82 | 1,59 | 1,55 | s |
| T-15 | 3,16 | 2,75 | 1,91 | 1,80 | 1,49 | 1,41 | s |
| T-30 | 3,19 | 2,82 | 2,16 | 2,08 | 1,75 | 1,51 | s |
| AbsC | 13,12 | 14,57 | 19,96 | 20,36 | 22,31 | 18,57 | % |
| AbsCg | 13,14 | 14,53 | 19,85 | 20,15 | 22,08 | 18,32 | % |
| MFP | 9,48 | 9,48 | 9,46 | 9,48 | 9,49 | 9,49 | m |
| Diffs | 21,33 | 23,84 | 26,28 | 28,80 | 31,25 | 31,30 | % |

*Figura 7.- Tabla y gráficas de los valores calculados del Tiempo de Reverberación*

Los resultados muestran una buena correspondencia entre todos los valores calculados del tiempo de reverberación para todas las frecuencias, que se traduce en una similar fluctuación en el paso de una banda de frecuencia a la contigua, lo que se ha conseguido aplicando los mencionados coeficientes de difusión por defecto. Tomando la estimación del descriptor T-30 se obtiene $\mathbf{RT_{mid}}$**= 2,12 s**. Este tiempo posibilita el uso de la sala para música sinfónica, si bien es más elevado que los registrados en la mayoría de las grandes salas de concierto de renombre mundial. Para el uso de la palabra en congresos, este tiempo de reverberación resultaría elevado. Los valores de Bass Ratio **BR = 1,42** y brillo **Br = 0,77** dan cuenta de una alta respuesta de la sala en graves y algo baja en agudos.

Asimismo se ha realizado un estudio del tiempo de reverberación a sala vacía, considerando la absorción de las butacas sin público y el escenario sin músicos. Utilizando el descriptor T-30, se obtiene $RT_{mid}$= 3,31 s, valor muy superior al recomendado para la música sinfónica, lo que repercutiría negativamente en los ensayos de la orquesta. Ello se debe a la fuerte diferencia de absorción que presentan las butacas ocupadas y vacías.

- *Claridad musical $C_{80}$*

El valor promedio de la claridad musical $C_{80}$ en las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz para los 52 receptores es $\mathbf{C_{80}(3)}$ **= 3,5 dB**, algo más elevado de lo recomendado por la bibliografía[6] para una sala de uso musical. Para la sala vacía se obtendría un promedio $C_{80}(3)$ = - 0,5 dB, que estaría dentro del margen recomendado. La drástica disminución del valor de la claridad musical $C_{80}$ (3) entre la sala llena y vacía está relacionada con el excesivo aumento del tiempo de reverberación entre ambas situaciones.

- *Fracción de energía lateral LF*

  El valor porcentual medio en sala vacía de la fracción de energía lateral LF en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz es **LF(4) = 22,4**, lo que daría en general una muy buena impresión espacial en la sala. Sin embargo, hay que destacar la irregularidad de los valores obtenidos en los ecogramas para los receptores, incluso estando contiguos.

- *RASTI*

  El RASTI iguala o supera el valor porcentual de 50 en todos los receptores, **siendo el valor medio de 58**. Estos resultados dan a la sala una categoría de "aceptable" en cuanto a la inteligibilidad de la palabra. Se trata de un resultado sorprendente al obtenerse en una sala con un tiempo de reverberación de 2,12 s que se ajusta a recintos destinados a música sinfónica. Así, la sala podría ser usada también para conferencias y congresos, y nos invita a revisar si valores aceptables de RASTI pueden ser compatibles con valores elevados del tiempo de reverberación.

### 2.5 Mediciones acústicas

La consultora García BBM realizó mediciones en sala llena y en sala vacía el año de la inauguración del auditorio. El órgano aún no estaba instalado. Las mediciones se redujeron a la obtención del tiempo de reverberación, de los ecogramas asociados a las posiciones de recepción y de las curvas NC para caracterizar el nivel de ruido de fondo de la sala. En base al informe emitido por la consultora[3], explicaremos el proceso de medición, los resultados obtenidos y las recomendaciones dadas al arquitecto.

Las mediciones en sala vacía fueron realizadas mediante la explosión de petardos, lo que permitió obtener los valores del tiempo de reverberación y los ecogramas. Se consideraron nueve posiciones de medida distribuidas en el patio de butacas (cuatro), primer anfiteatro (dos), anfiteatro lateral (dos), y tribuna trasera (una). Los registros se procesaron con un analizador de señal (HP), un ordenador HP 9816 y una impresora. El tiempo de reverberación en sala llena se midió a partir del registro del concierto inaugural con un aparato Sony PCM F1 y un registrador de vídeo Sony. La medida se obtuvo *"a partir de los acordes presentes…"*[3] en la versión de concierto de la ópera "La vida breve" de Falla. Posteriormente se realizaron otras mediciones del tiempo de reverberación a partir de otras tres actuaciones de distintas orquestas. Los valores obtenidos en las bandas desde 63 Hz hasta 8 kHz fueron los siguientes:

| **FRECUENCIA / Hz** | **63** | **125** | **250** | **500** | **1000** | **2000** | **4000** | **8000** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RT / s Sala llena | 1,95 | 2,15 | 2,39 | 2,23 | 2,08 | 1,92 | 1,75 | 1,33 |
| RT / s Sala vacía con butacas | 2,65 | 3,10 | 3,66 | 3,28 | 3,00 | 2,67 | 2,15 | 1,50 |

Tabla 2.- Tiempos de reverberación medidos en las bandas de octava

El tiempo de reverberación en sala llena, obtenido como media de los cuatro conciertos, fue para las frecuencias medias $RT_{mid}$ = 2,16 s, elevado pero dentro de lo requerido para música sinfónica. En la sala vacía se obtuvo $RT_{mid}$ = 3,14 s, valor excesivo para ser utilizada como sala de ensayos. García BBM achacó este problema a la baja absorción de las butacas sin ocupar. Como solución propuso introducir un sistema de acústica variable mediante la instalación de cortinas absorbentes, que permitieran reducir el tiempo de reverberación a valores similares a los obtenidos en sala llena. En la década de los noventa la consultora instaló un sistema de acústica variable consistente en paneles verticales que ocultan y exponen material absorbente, lo que permitió variar el tiempo de reverberación. Actualmente, tras la reforma emprendida en 2002, el Palau cuenta con nuevas butacas de la marca Figueras modelo 5067 Minispace[1]. Cabe destacar que en las frecuencias medias los valores medidos son muy próximos a los calculados en las simulaciones (sala llena $RT_{mid}$= 2,12 s; sala vacía $RT_{mid}$= 3,31 s), con diferencias inferiores a 1 jnd ("just noticeable difference")[7]. Las diferencias entre valores

medidos y simulados para los agudos están en torno a 1 jnd en sala llena y son inferiores a 1 jnd en sala vacía. En los graves las diferencias superan 1 jnd, lo que se explica por los bajos valores de absorción de las sillas introducidos en la simulación, especialmente en 125 Hz.

Según García BBM, los ecogramas muestran que tras el sonido directo "*llegan un grupo importante de reflexiones cortas con notable amplitud sumándose las primeras al sonido directo reforzándolo…, facilitando la claridad de la sala que contrasta con el tiempo de reverberación tan alto medido con la sala vacía*"[3].

Respecto al ruido de fondo, García BBM señala que "*el nivel de ruido de fondo generado por el aire acondicionado en la sala vacía equivale a una curva NC-22, lo que se considera óptimo*"[3].

## CONCLUSIONES

1.- El análisis de los ecogramas muestra que el número de reflexiones en las distintas partes de la sala es desigual, siendo la zona más beneficiada el patio de butacas merced al elevado número de reflexiones provenientes de las paredes y los antepechos de los balcones; este resultado se producía también en el Auditorio Nacional y reafirma el paralelismo en el diseño de ambas salas. El techo, sobre todo los paneles orientados longitudinalmente, tiene una participación notoria en las reflexiones de la zona central del primer anfiteatro, en los receptores delanteros de la tribuna lateral y en la tribuna trasera. Los techos en paneles de las tribunas laterales, primer anfiteatro y tribunas traseras participan, solos o en colaboración con las paredes, en las reflexiones en las localidades de esas zonas; no obstante, se habría podido mejorar su rendimiento en el interior de las tribunas laterales si se hubiera dado la inclinación inicialmente prevista a esos paneles. Las lámparas tienen poca participación, seguramente por su pequeño tamaño, no habiéndose detectado reflexiones directas provenientes de ellas sobre los receptores. Se detecta un posible eco en el receptor 35 de la tribuna trasera.

2.- Se ha simulado la sala con el programa CATT Acoustic. Los resultados son:

| PARÁMETRO ACÚSTICO | VALOR DE SIMULACIÓN |
|---|---|
| Nivel de presión sonora SPL | **> 69 dB, salvo en las zonas ya señaladas** |
| Sonoridad $G_{mid}$ | **7,4 dB (**sala vacía**)** |
| Tiempo de reverberación $RT_{mid}$ | **2,12 s** |
| Calidez acústica BR | **1,42** |
| Brillo Br | **0,77** |
| Claridad musical $C_{80}(3)$ | **3,5 dB** |
| Fracción de energía lateral LF (4) | **22,4 (**sala vacía**)** |
| RASTI | **58** |

3.- Se ha obtenido un acuerdo muy satisfactorio entre los valores simulados y medidos del tiempo de reverberación, lo que refuerza la fiabilidad de las simulaciones realizadas.

---

[1] Vallejo Ortega, G. La obra acústica del arquitecto García de Paredes. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid, 2011. El presente estudio acústico considera la concepción original de la sala por el arquitecto, no modificaciones posteriores.
[2] Cremer, L y Fütterer, T. Reports (acoustic advice for The National Auditorium of Madrid), 1982 y 1985. Trabajo inédito. Agradecemos al estudio de arquitectura Paredes-Pedrosa su colaboración por la aportación de este material.
[3] García Sanchermés, A y Mestre Sancho, V. Informe sobre asesoramiento acústico y mediciones realizadas en el Palau de la Música de Valencia, 1987. Trabajo inédito. Agradecemos al estudio Paredes-Pedrosa su aportación.
[4] Para la propuesta de absorción y difusión de los materiales se han consultado estas fuentes:
- CATT-Acoustic v8.0 *User´s Manual*, SPECTRA D´Sign Kopiering AB, Gothenburg, 2002.
- Beranek, L. Concert & Opera Halls. How they sound, A.S.A., New York, 1996.
- Mediciones de absorción de diferentes sillas a cargo de la consultora acústica García BBM. Material inédito. Agradecemos a Vicente Mestre (García BBM) el suministro de este material.

[5] García BBM midió la absorción por silla (ocupada: < 8 18 37 39 43 34 >, vacía: < 3 6 15 19 23 23 >)
Para deducir la absorción por metro cuadrado se ha considerado que la densidad de ocupación es de 1,9 personas/$m^2$.
[6] Entre otros autores, cabe citar:
- Barron, M. Auditorium Acoustics and Architectural design. E & FN Spon. Londres, 1993.
- Carrión Isbert, A. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (España), 1998.

[7] Cox, T.J. et al., "The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria", Acustica, 79, 1993, 27-41

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

# ÍNDICES ACÚSTICOS GLOBALES EN GRANDES ESPACIOS DE CULTO

**PACS**: 43.55.Gx

Girón, S.; Zamarreño, T.; Álvarez-Morales, L.; Galindo, M.
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC.
Avda. Reina Mercedes 2,
41012 Sevilla, España.
Tel.: + 34 954557129. Fax: +34 954557892.
E-Mail: sgiron@us.es, teofilo@us.es, calvarez6@us.es, mgalindo@us.es.

## ABSTRACT

This paper presents a method to synthesize the acoustic assessment of large reverberant places of worship for two types of sound stimuli: music and speech. The proposed synthetic indices are derived from the spectrally and spatially averaged values of various acoustic parameters, related to the attributes of perceived sensation and widely considered in other acoustic studies. Partial indices associated with each parameter are determined by comparing its average value with its range of optimum values and its environment of acceptable values that are set according to their respective differential thresholds (JND). The methodology implemented is applied to the acoustic assessment of five cathedrals of Andalusia.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un método para sintetizar la valoración acústica de grandes espacios reverberantes de culto para dos tipos de estímulos sonoros, la música y la palabra. Los índices sintéticos propuestos se obtienen a partir de los valores promediados espectral y espacialmente de seis parámetros acústicos, relacionados con los atributos de la sensación percibida y ampliamente considerados en otros estudios acústicos. Los índices parciales asociados a cada parámetro se determinan comparando el valor medio de éste con su rango de valores óptimos y entorno de valores aceptables que se fija en función de los umbrales diferenciales (JND) respectivos. La metodología implementada se aplica a la valoración acústica de cinco catedrales de Andalucía.

## INTRODUCCIÓN

La acústica de iglesias ha cobrado una creciente importancia desde hace algunas décadas por parte de la comunidad científica. Este interés se centra en varios aspectos: el valor histórico inmaterial del sonido de los espacios que está ligado a su creación arquitectónica; a las adaptaciones efímeras de estos recintos a eventos culturales que se comparten con fines litúrgicos; o finalmente como elementos de comprensión básica de la propagación del sonido

en estos a veces enormes volúmenes de gran complejidad espacial. Diversas campañas de medidas en iglesias de variada tipología y tamaño en varios países han dado lugar a un nutrido conjunto de resultados en este campo [1-4].

La norma UNE-EN-ISO 3382-1 [5] describe el procedimiento de medición, la instrumentación y procedimientos de obtención de los parámetros acústicos para la evaluación multidimensional de una sala de conciertos o espectáculos. Existen también métodos encaminados a representar la calidad acústica de una sala de conciertos mediante un único valor numérico; en este contexto destacan el método propuesto por Ando [6], y la adaptación del mismo llevada a cabo por Beranek [7]. La determinación de la calidad acústica mediante un único valor exige previamente seleccionar los parámetros acústicos estadísticamente independientes representativos de la sala. Los recintos de culto presentan características acústicas objetivas y subjetivas diferentes de las salas de conciertos y teatros, ya que no verifican las expectativas previstas en modelos de estos recintos, como han puesto de manifiesto varios autores [8, 9], y un tema reciente de investigación es la formulación de índices sintéticos para la acústica de estos edificios [10,11].

Inspirado en el estudio de Berardi [11], con modificaciones, en este trabajo se presenta un método para sintetizar la valoración acústica de grandes espacios reverberantes de culto para dos tipos de estímulos sonoros, la música y la palabra.

## METODOLOGIA

La síntesis de los parámetros acústicos de salas en un solo índice requiere seleccionar los parámetros independientes y combinarlos teniendo en cuenta su importancia relativa. Partiendo de los parámetros acústicos validados en la ISO 3382-1 [5] y medidos en los espacios catedralicios, en este trabajo, siguiendo a Berardi [11], se proponen dos índices sintéticos uno para la *música* y otro para la *palabra* considerando, 5 características acústicas para valorar el sonido: *reverberación*, *calidad sonora*, *espacialidad*, *fuerza sonora* y *claridad*. En el trabajo de este autor la primera característica está representada por el parámetro EDT [12], la calidad sonora (que propondremos cambiar por *calidez sonora*) se expresa a través de BR y $T_s$, la espacialidad a través de dos parámetros $J_{LF}$ e $IACC_E$, la fuerza sonora por $G$ y la claridad por $C_{50}$. Todos estos parámetros están definidos en la norma ISO [5] a excepción de Bass Ratio: $BR = (T^{125Hz} + T^{250Hz})/(T^{500Hz} + T^{1kHz})$ que ha sido introducido por Beranek [7].

En la muestra de iglesias a las que Berardi aplica su índice todos los parámetros acústicos mencionados son estadísticamente independientes. Sin embargo, en el caso de las catedrales que nos ocupa, el estudio de las correlaciones considerando los valores medios de los parámetros anteriores, medidos en condiciones de no ocupación [13], para las distintas posiciones de las fuentes y receptores asociados (ver Figura 1), muestran que existe una fuerte dependencia entre los parámetros EDT y $T_S$ ($r^2$=0.94) (ver Tabla 1). Los autores del presente trabajo obtuvieron también conclusiones semejantes, relativas a estos dos mismos parámetros, en un conjunto de iglesias Gótico-Mudéjares [14]. En la Figura 2 se muestran, para mayor claridad, las correlaciones más fuertes encontradas, que tienen lugar entre los parámetros $C_{80}$ y $C_{50}$ Figura 2(a), la cual era previsible y corresponde a dos parámetros que están uno en el

**Tabla 1**. Coeficientes de correlación lineal ($r^2$) entre los parámetros analizados. En negrita valores de $r^2$>0.6.

| | EDT | BR | $T_S$ | $J_{LF}$ | $IACC_E$ | $G$ | $C_{80}$ | $C_{50}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EDT | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| BR | 0.2683 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $T_S$ | **0.9426** | 0.2518 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| $J_{LF}$ | 0.0483 | 0.0758 | 0.0229 | --- | --- | --- | --- | --- |
| $IACC_E$ | 0.0882 | 0.0030 | 0.0553 | 0.2016 | --- | --- | --- | --- |
| $G$ | 0.0219 | 0.0032 | 0.0148 | 0.3149 | 0.0051 | --- | --- | --- |
| $C_{80}$ | 0.5537 | 0.0713 | **0.7583** | 0.0006 | 0.0066 | 0.0114 | --- | --- |
| $C_{50}$ | 0.4014 | 0.0569 | **0.6217** | 0.0018 | 0.0006 | 0.0159 | **0.9395** | ---- |

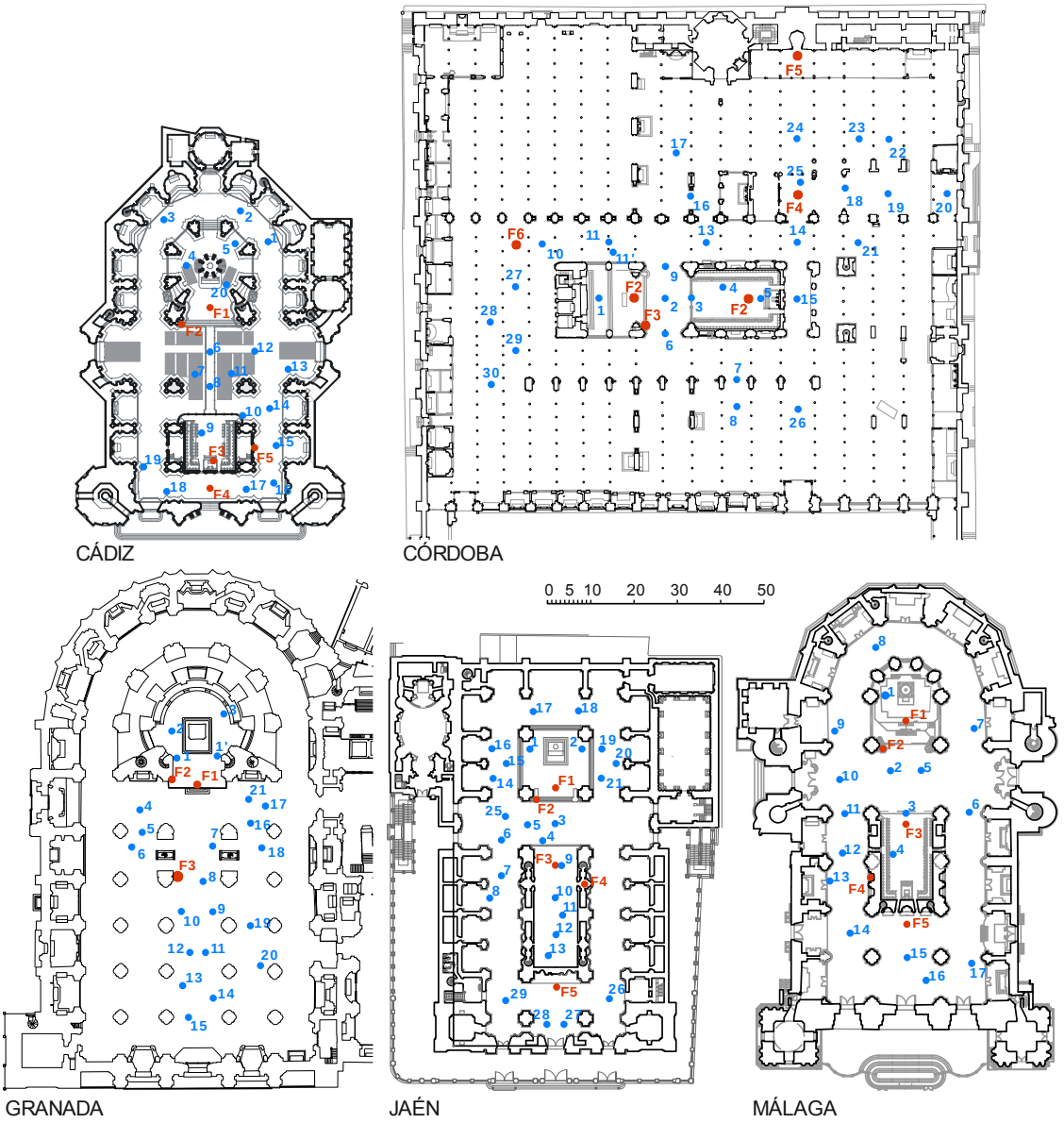



**Figura 1.** Planta de las cinco catedrales estudiadas a la misma escala, mostrando las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (numerados).

grupo de evaluación de la música y el otro de la palabra, y en la Figura 2(b) entre los parámetros EDT y $T_S$.

En consecuencia, se propone suprimir el parámetro $T_S$ de la lista de parámetros ortogonales descriptores de la calidad acústica y distribuir el peso que Berardi propone para él en la ecuación del índice global, entre el parámetro BR, en su mayor parte, y los parámetros de claridad. De este modo el aspecto que Berardi denomina calidad sonora, pasaría a ser *calidez sonora*, que es el aspecto que valora directamente BR. También, a diferencia de Berardi, en este trabajo, para la valoración de la claridad, se ha optado por utilizar $C_{50}$ para el índice de la palabra y $C_{80}$ para la música. En el primer caso, su relación con la inteligibilidad permite utilizar la escala de calificación de Marshall [15] para determinar el índice parcial asociado. Para obtener el índice parcial asociado a la claridad musical a partir de $C_{80}$ se ha adaptado la escala de Kosala [16]. Vale la pena también comentar que aunque Okano et al. [17] han encontrado una fuerte correlación entre el parámetro binaural $IACC_E$ y $J_{LF}$ en salas de conciertos, en los

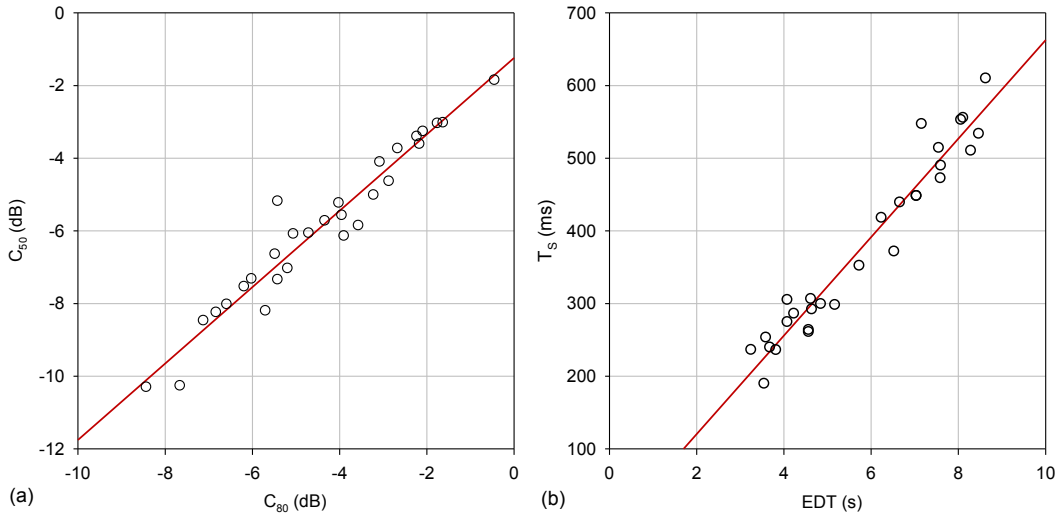



**Figura 2.** Regresión lineal, (a) entre $C_{50}$ y $C_{80}$ y (b) entre $T_s$ y EDT, obtenidas en las catedrales andaluzas.

recintos religiosos no se observan estas correlaciones, como ha señalado Berardi en las iglesias italianas y en nuestro caso se muestra en la Tabla 1. Por esta razón se incluyen ambos parámetros para evaluar las características de espacialidad de los espacios de culto.

Los valores utilizados de los umbrales diferenciales, JND, de estos parámetros son los de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [5], el propuesto por Martellotta [7] para $C_{80}$ en grandes espacios reverberantes y el de Marshall para $C_{50}$ [15]. Los factores de ponderación de cada índice parcial para obtener el índice global para la música y la palabra son los mismos que los propuestos por Berardi, salvo lo ya señalado anteriormente a la supresión de $T_s$ y al reparto de su peso entre BR y la claridad.

Se han adoptado también los mismos valores óptimos de los parámetros, considerando un rango ampliado, por arriba y por abajo si corresponde, incrementado en 1 JND: $P_{jopt} \pm JND_j$. Para los valores de los parámetros dentro del rango óptimo ampliado el índice parcial $i_j$, correspondiente al parámetro acústico $j$, vale 1. Fuera de este rango ampliado, el valor del índice parcial varía linealmente desde 1 hasta 0, de modo que el índice se anula cuando el parámetro disminuye/aumenta en 7 $JND_i$. La excepción a esta regla son los parámetros de lateralidad $J_{LF}$ e $IACC_E$. En este caso el límite inferior de la variación lineal, para evitar incongruencias (valores positivos del índice parcial para valor nulo del parámetro), se considera que el índice parcial vale 0 cuando el valor del parámetro es 0. Estas consideraciones se resumen en la Tabla 2 y en el conjunto de ecuaciones mostradas en el Apéndice, que permiten calcular los índices parciales de cada parámetro, para la música y la palabra, y cuya representación conjunta se muestra en la Figura 3. A partir de los índices parciales calculados, el índice total se obtiene de acuerdo a la expresión $P = \sum_{j=1}^{6} i_j \, a_j$, donde $a_j$ se refiere al peso de cada parámetro mostrado en la Tabla 2.

**Tabla 2**. Valores de JND, pesos, y rangos óptimos para la palabra y la música de cada uno de los parámetros acústicos. Se indican las frecuencias utilizadas para evaluar el valor promedio espectral.

| | EDT (s) (500-1k) | BR | $J_{LF}$ (125-1k) | $IACC_E$ (500-2k) | $G$ (dB) (500-1k) | $C_{80}$ (dB) (500-1k) | $C_{50}$ (dB) (500-1k) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $JND_j$ | 5% | 0.1 | 0.05 | 0.075 | 1 dB | 1.5 dB | 1.5 dB |
| $a_j$ | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.20 |
| Valor óptimo para la música | 2.1-4.2 | 1.10 | > 0.25 | > 0.35 | > 3 | >0 | --- |
| Valor óptimo la palabra | 0.8-1 | 1.05 | > 0.2 | > 0.35 | > 0 | --- | >0 |

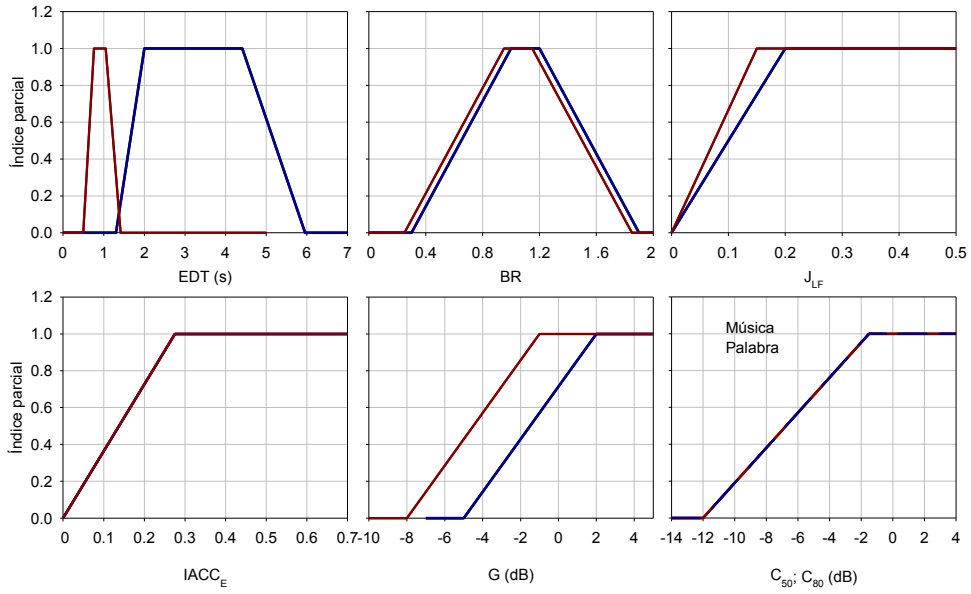



**Figura 3.** Representación gráfica de los seis índices parciales para la música y la palabra.

**Tabla 3**. Valores promediados espectral y espacialmente de los parámetros acústicos, valores calculados de los índices parciales asociados, para la música y para la palabra, asociados a cada posición de la fuente y para todas las fuentes, en cada catedral.

| | F | nR | EDT | $i_{EDTm}$ | $i_{EDTp}$ | BR | $i_{BRm}$ | $i_{BRp}$ | $J_{LF}$ | $i_{JLFm}$ | $i_{JLFp}$ | $IACC_E$ | $i_{IACCEm}$ | $i_{IACCEp}$ | $G$ | $i_{Gm}$ | $i_{Gp}$ | $C_{80}$ | $i_{C80m}$ | $C_{50}$ | $i_{C50p}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CÁDIZ | 1 | 14 | 8.62 | 0 | 0 | 1.29 | 0.87 | 0.80 | 0.16 | 0.80 | 1 | 0.47 | 1 | 1 | 1.87 | 0.98 | 1 | -8.44 | 0.34 | -10.29 | 0.16 |
| | 2 | 11 | 8.46 | 0 | 0 | 1.29 | 0.87 | 0.80 | 0.16 | 0.80 | 1 | 0.55 | 1 | 1 | 2.56 | 1 | 1 | -5.49 | 0.62 | -6.63 | 0.51 |
| | 3 | 7 | 8.05 | 0 | 0 | 1.29 | 0.87 | 0.80 | 0.14 | 0.70 | 0.93 | 0.48 | 1 | 1 | 1.64 | 0.95 | 1 | -6.60 | 0.51 | -8.01 | 0.38 |
| | 4 | 4 | 4.84 | 0.72 | 0 | 1.31 | 0.84 | 0.77 | 0.26 | 1 | 1 | 0.30 | 1 | 1 | 6.93 | 1 | 1 | -2.88 | 0.87 | -4.62 | 0.70 |
| | 5 | 3 | 7.15 | 0 | 0 | 1.30 | 0.86 | 0.79 | 0.15 | 0.75 | 1 | 0.61 | 1 | 1 | 2.48 | 1 | 1 | -7.67 | 0.41 | -10.25 | 0.17 |
| | T | 39 | 7.42 | 0 | 0 | 1.30 | 0.89 | 0.79 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.48 | 1 | 1 | 3.10 | 1 | 1 | -6.22 | 0.55 | -7.96 | 0.38 |
| CÓRDOBA | 1 | 13 | 4.61 | 0.86 | 0 | 1.09 | 1 | 1 | 0.15 | 0.75 | 1 | 0.50 | 1 | 1 | 3.40 | 1 | 1 | -4.35 | 0.73 | -5.71 | 0.60 |
| | 2 | 7 | 4.07 | 1 | 0 | 1.10 | 1 | 1 | 0.18 | 0.90 | 1 | 0.43 | 1 | 1 | 2.65 | 1 | 1 | -5.71 | 0.60 | -8.19 | 0.36 |
| | 3 | 10 | 4.56 | 0.90 | 0 | 1.08 | 1 | 1 | 0.2 | 1 | 1 | 0.49 | 1 | 1 | 2.15 | 1 | 1 | -2.24 | 0.93 | -3.39 | 0.82 |
| | 4 | 8 | 3.24 | 1 | 0 | 1.01 | 1 | 1 | 0.16 | 0.80 | 1 | 0.54 | 1 | 1 | 5.06 | 1 | 1 | -3.91 | 0.77 | -6.13 | 0.56 |
| | 5 | 8 | 4.07 | 1 | 0 | 1.02 | 1 | 1 | 0.11 | 0.55 | 0.73 | 0.65 | 1 | 1 | 0.87 | 0.84 | 1 | -3.96 | 0.77 | -5.56 | 0.61 |
| | 6 | 4 | 3.58 | 1 | 0 | 1.06 | 1 | 1 | 0.14 | 0.70 | 0.93 | 0.44 | 1 | 1 | -1.43 | 0.51 | 0.94 | -3.58 | 0.80 | -5.84 | 0.59 |
| | T | 50 | 4.02 | 1 | 0 | 1.06 | 1 | 1 | 0.16 | 0.80 | 1 | 0.51 | 1 | 1 | 2.12 | 1 | 1 | -3.96 | 0.77 | -5.8 | 0.59 |
| GRANADA | 1 | 18 | 8.1 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.21 | 1 | 1 | 0.18 | 0.65 | 0.65 | -0.14 | 0.69 | 1 | -6.84 | 0.49 | -8.23 | 0.36 |
| | 2 | 18 | 8.28 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.2 | 1 | 1 | 0.23 | 0.84 | 0.84 | -0.14 | 0.69 | 1 | -4.72 | 0.69 | -6.05 | 0.57 |
| | 3 | 12 | 7.03 | 0 | 0 | 1.15 | 1 | 1 | 0.15 | 0.75 | 1 | 0.23 | 0.84 | 0.84 | 3.34 | 1 | 1 | -5.43 | 0.63 | -5.17 | 0.65 |
| | T | 48 | 7.8 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.19 | 0.95 | 1 | 0.21 | 0.76 | 0.76 | 1.02 | 0.86 | 1 | -5.66 | 0.6 | -6.49 | 0.52 |
| JAÉN | 1 | 21 | 7.54 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.47 | 1 | 1 | 2.18 | 1 | 1 | -7.13 | 0.46 | -8.46 | 0.34 |
| | 2 | 17 | 7.58 | 0 | 0 | 1.15 | 1 | 1 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.47 | 1 | 1 | 1.94 | 0.99 | 1 | -5.07 | 0.66 | -6.07 | 0.56 |
| | 3 | 12 | 7.03 | 0 | 0 | 1.14 | 1 | 1 | 0.16 | 0.80 | 1 | 0.40 | 1 | 1 | 3.34 | 1 | 1 | -5.43 | 0.63 | -7.33 | 0.44 |
| | 4 | 11 | 7.59 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.19 | 0.95 | 1 | 0.45 | 1 | 1 | 2.08 | 1 | 1 | -6.03 | 0.57 | -7.31 | 0.45 |
| | 5 | 4 | 5.16 | 0.51 | 0 | 1.18 | 1 | 0.96 | 0.18 | 0.90 | 1 | 0.46 | 1 | 1 | -1.05 | 0.56 | 0.99 | -2.10 | 0.94 | -3.25 | 0.83 |
| | T | 65 | 6.98 | 0 | 0 | 1.16 | 1 | 0.99 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.45 | 1 | 1 | 1.70 | 0.96 | 1 | -5.15 | 0.65 | -6.47 | 0.53 |
| MÁLAGA | 1 | 16 | 6.65 | 0 | 0 | 1.22 | 0.97 | 0.9 | 0.19 | 0.95 | 1 | 0.50 | 1 | 1 | 0.09 | 0.73 | 1 | -6.2 | 0.55 | -7.52 | 0.43 |
| | 2 | 11 | 6.52 | 0 | 0 | 1.21 | 0.99 | 0.91 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.50 | 1 | 1 | 2.68 | 1 | 1 | -2.68 | 0.89 | -3.72 | 0.79 |
| | 3 | 13 | 6.23 | 0 | 0 | 1.21 | 0.99 | 0.91 | 0.19 | 0.95 | 1 | 0.44 | 1 | 1 | 2.40 | 1 | 1 | -5.2 | 0.65 | -7.02 | 0.47 |
| | 4 | 7 | 5.72 | 0.15 | 0 | 1.22 | 0.97 | 0.90 | 0.17 | 0.85 | 1 | 0.46 | 1 | 1 | 0.45 | 0.78 | 1 | -3.23 | 0.84 | -5 | 0.67 |
| | 5 | 4 | 4.56 | 0.90 | 0 | 1.23 | 0.96 | 0.89 | 0.24 | 1 | 1 | 0.52 | 1 | 1 | 5.81 | 1 | 1 | -1.64 | 0.99 | -3.01 | 0.86 |
| | T | 51 | 5.94 | 0.01 | 0 | 1.22 | 0.97 | 0.90 | 0.19 | 0.95 | 1 | 0.48 | 1 | 1 | 2.29 | 1 | 1 | -3.79 | 0.78 | -5.25 | 0.64 |

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología anterior se ha aplicado a cinco catedrales andaluzas: la de Cádiz, la Catedral-Mezquita de Córdoba, la de Granada, la de Jaén y la de Málaga, (Figura 1). Las medidas se han realizado siguiendo un protocolo común, escogiendo las posiciones dentro de los recintos donde suele ubicarse la fuente natural en directo de naturaleza musical, hablada o cantada [18]. Los valores promedio de los parámetros acústicos correspondientes a cada posición de la fuente sonora, el número de receptores afectado para cada una de ellas, y los índices parciales calculados de los parámetros acústicos para cada catedral se muestran en la Tabla 3.

De acuerdo con la formulación propuesta, la Figura 4 muestra los resultados de los índices sintéticos calculados para cada posición de la fuente sonora en cada catedral y los valores globales considerando el valor medio de todos los receptores en cada espacio. Para su comparación se incluyen también los resultados de los índices de Berardi.

Un análisis de los datos revela que en ninguna catedral se presenta alguna posición de la fuente problemática ni para la música ni la palabra, y que las posiciones más favorables para la *música* son el trascoro (F4) de la Catedral de Cádiz, todas las posiciones de la fuente sonora en la Catedral-Mezquita de Córdoba que se sitúan en el intervalo 0.8-1.0, siendo la mejor de todas ellas la posición F3 en el púlpito, la posición F5 de la Catedral de Jaén, que corresponde al trascoro, y asimismo la posición F5 de la de Málaga también en el trascoro. Los valores de los índices sintéticos de la *palabra* se sitúan en un valor medio en torno a 0.6, coincidente con el índice para la música en la mayoría de las posiciones de la fuente sonora de todas las catedrales, siendo los más altos el correspondiente al púlpito de la Catedral-Mezquita de Córdoba, y a los trascoros de las catedrales de Jaén y Málaga. En la valoración global destaca lógicamente la Catedral-Mezquita de Córdoba frente a las otras catedrales.

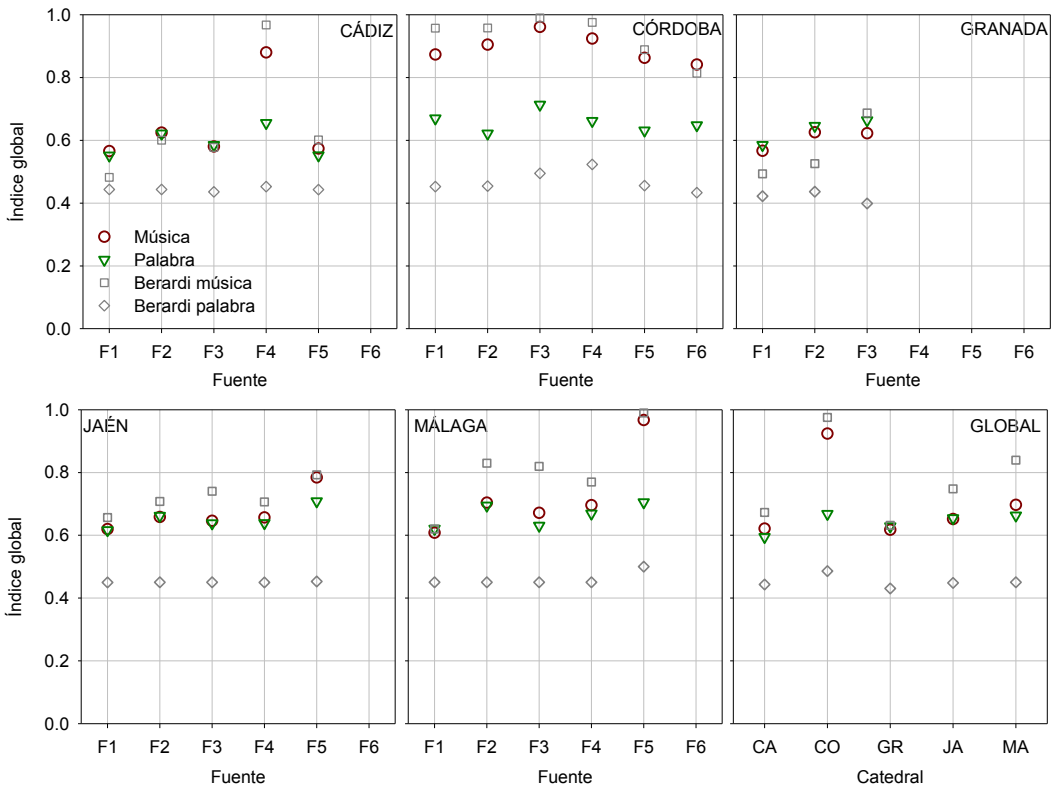



**Figura 4.** Índices sintéticos globales para la música y la palabra en cada catedral según su posición de fuente sonora y en la última representación gráfica considerando todas las fuentes en cada catedral. Se incluyen también los resultados de los índices de Berardi.

En cuanto a la comparación con los índices propuestos por Berardi, observamos que existe muy buena concordancia en relación al índice sintético de la música en las dos propuestas de evaluación, para los índices sintéticos de la palabra la propuesta de Berardi ofrece índices más pequeños, que apenas distingue entre las distintas fuentes sonoras y cuyo valor oscila en torno a 0.4-0.5 en todas las catedrales y para todas las fuentes sonoras. Lo mismo cabe decir cuando se analizan los resultados globales en las catedrales. El origen de las divergencias puede situarse, más que en la supresión del parámetro acústico $T_S$ y el cambio de rangos óptimos de algunos parámetros, en que en el trabajo de Berardi existen incertidumbres y ambigüedades en cómo se calcula el índice de acuerdo a la ecuación aportada, al rango óptimo del parámetro $C_{50}$ que es 0 dB y aparece en un denominador etc., lo que lleva a los autores de este trabajo a no tener seguridad de que se hayan calculado adecuadamente estos índices sintéticos para la palabra.

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo pretende sintetizar la acústica de grandes espacios de culto a través de una comparación de los valores medios de seis parámetros acústicos ortogonales, que evalúan cinco características acústicas de los espacios, promediados en los receptores que afectan a cada posición de la fuente sonora de la catedral con sus valores óptimos. Los valores óptimos se han basado en trabajos al respecto de la literatura científica.

Los resultados destacan a la Catedral-Mezquita de Córdoba como un espacio idóneo para la audición de la música en las seis posiciones de la fuente sonora estudiadas y también para la palabra y el canto a pesar de su gran volumen, pero con tiempos de reverberación más cortos y valores más próximos al óptimo del resto de los parámetros de energía, tiempo y lateralidad que el resto de los espacios catedralicios estudiados. El estudio también destaca el espacio del trascoro en las catedrales de las que disponen de él como un lugar adecuado para la realización de conciertos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su más sincero agradecimiento a los deanes de las catedrales por facilitar el acceso para la realización de las medidas. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER y por los proyectos concedidos por el Ministerio de Economía y Competitividad con referencias CEI 2014/731 y BIA2014-56755-P.

## REFERENCIAS

[1] E. Cirillo, F. Martellotta. “Worship, acoustics and architecture”, Multi-Science Publishing, Essex, UK (2006).
[2] A. P .O. Carvalho, A. E. J. Morgado, L. Henrique. “Relationship between subjective and objective acoustical measures in churches”. Build. Acoust. 4, 1–20 (1997).
[3] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro. “Acoustics in churches”, en Computational Acoustics in Architecture, J.J. Sendra [Ed.], Computational Mechanics Publications, Southampton, 133–177 (1999).
[4] Y. Soeta, K. Ito, R. Shimokura, S. Sato, T. Ohsawa, Y. Ando. “Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches”. J. Acoust. Soc. Am. 131(2), 1206–20 (2012).
[5] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).
[6] Y. Ando. “Architectural acoustics: blending, sound sources, sound fields, and listeners”. Springer, New York, (1998).
[7] L. L. Beranek. “Concert and opera halls: how they sound”. Acoustical Society of America, Nueva York, (1996).
[8] T. Zamarreño, S. Girón M. Galindo. “Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches”. J. Acoust. Soc. Am. 121, 234-250 (2007).
[9] F. Martellotta. “The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces”. J. Acoust. Soc. Am. 128, 654-663 (2010).
[10] K. Kosala. “A single number index to assess selected acoustic parameters in churches with redundant information”. Arch. Acoust. 36, 545-560 (2011).
[11] U. Berardi. “A double synthetic index to evaluate the acoustics of churches”. Arch. Acoust. 37(4), 521-528 (2012).

[12] F. Martellotta. "Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches". J. Sound Vib. 317, 378-399 (2008).
[13] L. Álvarez-Morales, T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo. "A methodology for the study of the acoustic environment of catholic cathedrals: application to the cathedral of Malaga". Build. Environ. 72, 102-115 (2014).
[14] M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño. "Correlations of the acoustic fields of Mudejar-Gothic churches". Build. Acoust. 15, 175-196 (2008).
[15] L. G. Marshall. "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio". J. Acoust. Soc. Am. 96, 2251-2261 (1994).
[16] K. Kosała, Z. W. Engel. "Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach". Appl. Acoust. 74(10), 1144–1152 (2013).
[17] T. Okano, L. L. Beranek, T. Hidaka. "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls". J. Acoust. Soc. Am. 104, 255-265 (1998).
[18] L. Álvarez-Morales, M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño**. "**La acústica de las catedrales andaluzas". Proceedings of Tecniacustica 2013, Valladolid pp. 901-908.

## APÉNDICE

Índice parcial, $i_j$, de cada parámetro, $j$, para la valoración de la música y de la palabra hablada o cantada.

| MÚSICA | | PALABRA | |
|---|---|---|---|
| $0 \le EDT \le 1.3$ | $i_{EDT} = 0$ | $0 \le EDT \le 0.48$ | $i_{EDT} = 0$ |
| $1.3 < EDT < 2.0$ | $i_{EDT} = (EDT - 1.3)/0.7$ | $0.48 < EDT < 0.76$ | $i_{EDT} = (EDT - 0.48)/0.28$ |
| $2.0 \le EDT \le 4.4$ | $i_{EDT} = 1$ | $0.76 \le EDT \le 1.05$ | $i_{EDT} = 1$ |
| $4.4 < EDT < 5.95$ | $i_{EDT} = (-EDT + 5.95)/1.55$ | $1.05 < EDT < 1.4$ | $i_{EDT} = (-EDT + 1.4)/0.35$ |
| $5.95 \le EDT < \infty$ | $i_{EDT} = 0$ | $1.4 \le EDT < \infty$ | $i_{EDT} = 0$ |
| $0 \le BR \le 0.3$ | $i_{BR} = 0$ | $0 \le BR \le 0.25$ | $i_{BR} = 0$ |
| $0.3 < BR < 1.0$ | $i_{BR} = (BR - 0.3)/0.7$ | $0.25 < BR < 0.95$ | $i_{BR} = (BR - 0.25)/0.7$ |
| $1.0 \le BR \le 1.2$ | $i_{BR} = 1$ | $0.95 \le BR \le 1.15$ | $i_{BR} = 1$ |
| $1.2 < BR < 1.9$ | $i_{BR} = (-BR + 1.9)/0.7$ | $1.15 < BR < 1.85$ | $i_{BR} = (-BR + 1.85)/0.7$ |
| $1.9 \le BR < \infty$ | $i_{BR} = 0$ | $1.85 \le BR < \infty$ | $i_{BR} = 0$ |
| $0 \le J_{LF} < 0.20$ | $i_{JLF} = J_{LF}/0.20$ | $0 \le J_{LF} < 0.15$ | $i_{JLF} = J_{LF}/0.15$ |
| $0.20 \le J_{LF} \le 1$ | $i_{JLF} = 1$ | $0.15 \le J_{LF} \le 1$ | $i_{JLF} = 1$ |
| $0 \le IACC_E < 0.275$ | $i_{IACCE} = IACC_E/0.275$ | $0 \le IACC_E < 0.275$ | $i_{IACCE} = IACC_E/0.275$ |
| $0.275 \le IACC_E \le 1$ | $i_{IACCE} = 1$ | $0.275 \le IACC_E \le 1$ | $i_{IACCE} = 1$ |
| $-\infty < G \le -5$ | $i_G = 0$ | $-\infty < G \le -8$ | $i_G = 0$ |
| $-5 < G < 2$ | $i_G = (G + 5)/7$ | $-8 \le G \le -1$ | $i_G = (G + 8)/7$ |
| $2 \le G < \infty$ | $i_G = 1$ | $-1 < G < \infty$ | $i_G = 1$ |
| $-\infty < C_{80} \le -12$ | $i_{C80} = 0;$ | $-\infty < C_{50} \le -12$ | $i_{C50} = 0;$ |
| $-12 < C_{80} < -1.5$ | $i_{C80} = (C_{80} + 12)/10.5$ | $-12 < C_{50} < -1.5$ | $i_{C50} = (C_{50} + 12)/10.5$ |
| $-1.5 \le C_{80} < \infty$ | $i_{C80} = 1$ | $-1.5 \le C_{50} < \infty$ | $i_{C50} = 1$ |

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SOPORTE DE ESCENA EN TEATROS Y AUDITORIOS

**PACS**: 43.55.Gx

Planells, Ana[1]; Girón, Sara[2]; Cerdá, Salvador[1]; Segura, Jaume[1]; Cibrián, Rosa[1]; Zamarreño, Teófilo[2]; Giménez, Alicia[1].
[1]Grupo de Investigación en Acústica Virtual Universitat Politècnica de València-Universitat de València. Edificio 5D
Camino de Vera s/n
46022 Valencia-Spain. acusvirt@upv.es
[2]Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla.
Av. Reina Mercedes 2
41012 - Sevilla, España,
Tel: +34 954 557 129, Fax: +34 954 557 892
E-mails: sgiron@us.es; teofilo@us.es

## ABSTRACT

Acoustics of the stage is of particular interest since it focuses on the study of the acoustic environment and the assessment of the sensation perceived by the performers of classical orchestras in concert halls. The ISO 3382-1 standard introduces two monophonic objective parameters of stage support, ST: early support ($ST_{Early}$), related to the ease of hearing the other members of an orchestra; and late support ($ST_{Late}$), related to the response of the hall as perceived by the musician. In this work, the behaviour of these two objective parameters measured in several halls from the Valencian Community of various typologies, acoustic characteristics, and geometric-architectural variables of the stage are analysed in order to study their variability and dependence on the type of hall.

## RESUMEN

La acústica del escenario resulta de especial interés ya que centra el estudio del entorno acústico y la valoración de la sensación percibida por los intérpretes de orquestas clásicas en las salas de conciertos. La norma ISO 3382-1 introduce dos parámetros objetivos monofónicos soporte de escena, ST: soporte precoz ($ST_{precoz}$), relacionado con la facilidad de audición de los demás miembros de la orquesta, y soporte tardío ($ST_{tardío}$), relacionado con la respuesta de la sala percibida por el músico. En este trabajo se analiza el comportamiento de estos dos parámetros objetivos medidos en varias salas de conciertos de la Comunidad Valenciana de diferentes tipologías, características acústicas y variables geométrico-arquitectónicas de los escenarios, con objeto de estudiar su variabilidad y su dependencia con el tipo de sala.

## INTRODUCCIÓN

Bajo el concepto de acústica del escenario se hace referencia al estudio del entorno acústico y de la valoración de la sensación percibida por los intérpretes de orquestas clásicas de la escena en las salas de concierto, teatros, auditorios y salas de ópera. Las primeras aportaciones sistemáticas de los requerimientos acústicos de los músicos, basados en experimentos

subjetivos, arrancan de los trabajos de Marshall *et al.* [1], utilizando los resultados de un trío de cuerda que interpreta en un entorno acústico simulado en condiciones de laboratorio; siguen los de Barron [2], basados en los resultados con un mayor número de músicos en una sala existente con un escenario cuya acústica era altamente variable. Ambos trabajos pioneros pusieron de manifiesto el efecto positivo en la sensación percibida por los músicos al recibir reflexiones precoces.

Los factores acústicos más importantes para los intérpretes son la audición de su propio instrumento, la de los otros instrumentos de la orquesta y la percepción de la respuesta acústica de la sala. El equilibrio entre estos factores es importante para la reproducción de *conjunto*. Los parámetros objetivos más reconocidos para valorar la acústica del escenario son los de soporte de escena, ST, en sus dos versiones: soporte precoz ($ST_{precoz}$), para la percepción subjetiva de *conjunto y apoyo* entre los músicos de la orquesta; y el soporte tardío ($ST_{tardío}$) para la percepción de la *reverberación* por parte del músico en la escena. Aunque se han propuesto aproximaciones objetivas alternativas o complementarias [3] y se ha criticado la validez de los parámetros ST [4], estos descriptores, introducidos en 1989 por Gade [5, 6], han sido recogidos, con carácter informativo, en el Anexo C de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [7]. Ambos parámetros se derivan de las respuestas al impulso, omnidireccionales monofónicas, obtenidas a 1 m de la fuente, sin los intérpretes en el escenario, y se definen matemáticamente como:

$$ST = 10\log\left[\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt \Big/ \int_0^{0.01} p^2(t)dt\right]_{r=1m} \quad (dB) \qquad (1)$$

donde $t$ =0 coincide con la llegada del sonido directo. $ST_{precoz}$ integra el sonido reflejado inicial, con límites $t_1$=20 ms y $t_2$=100 ms, en relación con la energía emitida desde la fuente (sonido directo y reflexión en el suelo) a 1 m. No se ha establecido un umbral de discriminación subjetiva para $ST_{precoz}$ pero se ha sugerido [8] que una variación de 2 dB puede ser significativa para un músico. Para $ST_{tardío}$ los límites para el sonido reflejado son $t_1$=100 ms, y $t_2$=1000 ms. Las medidas se realizan en bandas de octava y se trabaja con el promedio aritmético de las comprendidas entre 250 Hz y 2000 Hz. Gade definió también el parámetro $ST_{total}$ para valorar el apoyo desde la sala, pero no se ha incluido en [7]; los límites en este caso son $t_1$=20 ms y $t_2$=1000 ms y, por tanto, es la suma logarítmica de los dos anteriores. En [7] se han recogido las principales sugerencias de Gade [9] para su medida, a excepción de medir más allá de 4 m de cualquier superficie reflectante, que se ha reducido a 2 m.

Recientemente este mismo autor [10] ha publicado una revisión sobre la acústica de la escena tras tres décadas de investigación experimental, destacando las aportaciones de Dammerud *et al*. con trabajos puramente objetivos (modelos a escala y computacionales de gran interés) y modelos subjetivos [3,11]. También conviene señalar el estudio realizado por Wenmaekers *et al.* [12] sobre cuáles son los intervalos temporales más apropiados y cuáles las condiciones de medición más adecuadas, haciendo una propuesta de optimización de los parámetros de soporte de escena existentes.

En este trabajo se analiza el comportamiento de los dos parámetros objetivos de escena medidos en varias salas de conciertos de diferentes tipologías de la Comunidad Valenciana que han sido objeto de estudio en varios proyectos de investigación de los autores de la comunicación.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Los procedimientos empleados han sido los establecidos en la ISO-3382-1 [7], y las medidas se llevaron a cabo sin la presencia de público, ni músicos, y el escenario libre de sus instrumentos. Se controlaron la temperatura y la humedad relativa mediante un termo-higrómetro de precisión siendo el rango de variación de 22-28ºC y 60-70%, respectivamente. La respuesta al impulso se ha obtenido mediante barridos sinusoidales, generados y analizados por el programa WinMLS 2004 mediante una tarjeta de sonido PCMIA de la firma DIGIGRAM, mod. VXpocket V2 de dos canales. La fuente omnidireccional DO-12 de 01-dB

Stell se localiza a 1 m del suelo. Los micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK ½-pulgada omnidireccionales (y su correspondiente fuente, GRAS 12AA, y preamplificador G.R.A.S Type 26AK) se sitúan a 1 m del suelo y a una distancia fuente receptor de 1 m. En algunas salas las respuestas al impulso se han obtenido también con otras señales (MLS y ruido rosa) comprobándose que los parámetros de escena no presentan variaciones significativas obtenidos con una u otra señal. Las respuestas al impulso (RI) monoaurales medidas fueron posteriormente procesadas para obtener los parámetros de soporte de escena para cada banda de octava en el rango de frecuencias de 125-4000 Hz, en cada receptor.

## DATOS ARQUITÉCTONICOS Y ACÚSTICOS DE LAS SALAS

La muestra estudiada está constituida por siete salas de la Comunidad Valenciana de variada tipología y tamaño. En la Tabla 1 se incluyen los datos más relevantes de las mismas, nombre y acrónimos ordenados alfabéticamente, localización, año de construcción o restauración, fotografías y datos geométricos relevantes de la sala y de sus escenarios.

**Tabla 1.** Datos y fotografías de la zona de audiencia y escenarios de las salas estudiadas.

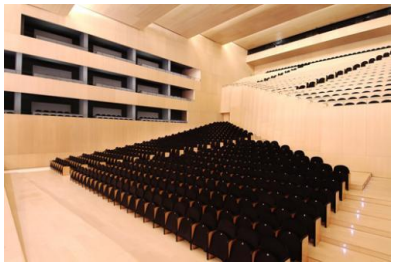
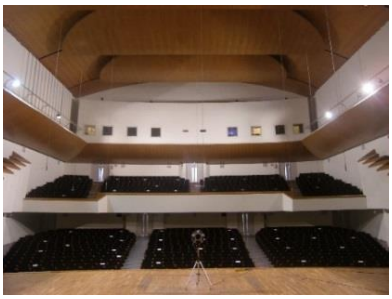
| Acrónimo, localización, fecha. Forma | | Datos sala | Datos escena |
|---|---|---|---|
| Vista sala zona audiencia | Vista del escenario | | |
| Auditorio Palacio de Congresos (APC), Castellón de la Plana, 2004. Irregular | | $V_S$=14850+4891= =19741 $m^3$<br>N=1200 butacas<br>V/N=12.4<br>Receptores= 51 | $V_E$=4891 $m^3$<br>S=242 $m^2$<br>An=19.6 m<br>Al=17.2 m<br>Pr=12.4 m<br>Al/An=0.88<br>Pr/An=0.63<br>Receptores=8 |
|  |  | | |
| Gran Teatro A. Ferrandis de Paterna (GTF), 1928 (2000). Rectangular | | V=2700+4592= =7292 $m^3$<br>N=535 butacas<br>V/N=4.8<br>Receptores= 25 | $V_E$=4592 $m^3$<br>S=276 $m^2$<br>An=20.7 m<br>Al=17.8 m<br>Pr=12.5 m<br>Al/An=0.86<br>Pr/An=0.60<br>Receptores= 4 |
|  |  | | |
| Palau des Arts Sala Auditori (PAA), 2005. Flecha-abanico | | $V_S$=17690+3740= =21430 $m^3$<br>N=1500 butacas<br>V/N=11.8<br>Receptores=28 | $V_E$= 3740 $m^3$<br>S=194 $m^2$<br>An= 15.3 m<br>Al= 19.3 m<br>Pr=12.6 m<br>Al/An=1.26<br>Pr/An=0.82<br>Receptores=8 |
|  |  | | |

**Tabla 1.** Datos y fotografías de la zona de audiencia y escenarios de las salas estudiadas. (Cont.)

| Acrónimo, localización, fecha. Forma | | Datos sala | Datos escena |
|---|---|---|---|
| Vista sala zona audiencia | Vista del escenario | | |
| Palau de la Música, Sala Iturbi (PMI), 1987. Abanico | | $V_S$=14700+2980= =17680 $m^3$<br>N=1817 butacas<br>V/N=8.1<br>Receptores= 66 | $V_E$=2980 $m^3$<br>S=187 $m^2$<br>An=16.6 m<br>Al=15.90 m<br>Pr=10.7 m<br>Al/An=0.96<br>Pr/An=0.64<br>Receptores=4 |
|  |  | | |
| Teatro de la Banda Primitiva de Lliria (TBP), 1951 (1992). Abanico (2 niveles) | | V=967+2590= =3557$m^3$<br>N=967 butacas<br>V/N=5.5<br>Receptores= 81 | $V_E$= 2590 $m^3$<br>S= 176 $m^2$<br>An= 13.4 m<br>Al= 14.8 m<br>Pr= 12.9 m<br>Al/An=1.10<br>Pr/An=0.96<br>Receptores=14 |
|  |  | | |
| Teatro Principal (TPA), Alicante, 1847, 1905-1915. Herradura | | V=4539+4765= =9304 $m^3$<br>N=1072 butacas<br>V/N=4.1<br>Receptores= 39 | $V_E$= 4765 $m^3$<br>S= 219 $m^2$<br>An= 16.9 m<br>Al= 21.8 m<br>Pr= 13.5 m<br>Al/An=1.29<br>Pr/An=0.80<br>Receptores=4 |
|  |  | | |
| Teatro Principal de Valencia (TPV), 1832-1991. Herradura | | V=6986+4091= =11077 $m^3$<br>N=1924 butacas<br>V/N=5.7<br>Receptores=53 | $V_E$=4091 $m^3$<br>S= 329 $m^2$<br>An= 17.2 m<br>Al= 12.5 m<br>Pr= 17.5 m<br>Al/An=0.72<br>Pr/An=1.02<br>Receptores=12 |
|  |  | | |

En la Tabla 2 se presentan los tiempos de reverberación, promediados espacialmente en cada uno de los recintos escénicos en todos los puntos de medida (Tabla 1, columna 3), en bandas de octava. Destacan las salas, Teatro Principal de Alicante (TPA) y Teatro Principal de Valencia (TPV) como las salas más sordas en todas las bandas de octava.

## RESULTADOS

En la primera sección de este apartado se describen los resultados experimentales de los dos parámetros de escena, en lo que se refiere a su comportamiento espectral, para las

**Tabla 2.** Tiempos de reverberación (en segundos) de las salas.

| Sala | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| APC | 1.97 | 2.24 | 2.39 | 2.51 | 2.32 | 2.10 |
| GTF | 2.50 | 2.14 | 1.70 | 1.53 | 1.48 | 1.40 |
| PAA | 1.55 | 1.73 | 1.94 | 2.02 | 1.99 | 1.92 |
| PMI | 2.37 | 2.53 | 2.53 | 2.34 | 2.10 | 1.85 |
| TBP | 1.93 | 1.66 | 1.41 | 1.30 | 1.21 | 1.07 |
| TPA | 1.43 | 1.43 | 1.26 | 1.17 | 1.15 | 1.09 |
| TPV | 1.59 | 1.58 | 1.52 | 1.47 | 1.35 | 1.18 |

frecuencias comprendidas entre 125-4000 Hz. En las dos secciones siguientes se realiza un análisis de los valores promedios espectrales de los parámetros.

**Parámetros de Escena en función de la Frecuencia**

En la Figura 1 se presenta el comportamiento espectral de los parámetros de escena para los 7 recintos de la Comunidad Valenciana estudiados, considerando las bandas de octava comprendidas entre 125-4000 Hz. La zona gris delimita los valores máximos y mínimos de los parámetros para cada banda de octava. La línea negra es el promedio espacial del parámetro en cada una de las seis bandas de octava. Cabe señalar que en la mayor parte de las salas hay gran variabilidad entre los diferentes puntos de medida, en especial para el parámetro $ST_{precoz}$. Presentan una menor variabilidad el teatro Ferrandis de Paterna, el Palau de la Música y el teatro Principal de Alicante, en especial a frecuencias bajas y medias. Los promedios espaciales, marcados por las líneas de color negro, muestran una gran variabilidad con la frecuencia, tanto para el parámetro precoz como el tardío; una tendencia similar se ha observado en otros recintos escénicos españoles [13] y del Reino Unido [14].

Considerando un decaimiento del sonido en el recinto escénico puramente exponencial (campo sonoro difuso), la densidad de energía reflejada normalizada depende del volumen *V* del recinto (Tabla 1) y del tiempo de reverberación *T* en las diferentes bandas de octava (Tabla 2), que puede expresarse como:

$$\varepsilon'(t)=\frac{\varepsilon(t)}{E_{D10}}=\frac{13.82\cdot 31200}{V}e^{-\frac{13.82t}{T}}\quad (s^{-1})\qquad 0\le t<\infty, \tag{2}$$

Y así, sustituyendo e integrando en el numerador de la ecuación (1), y aproximando el denominador al sonido directo y a la reflexión especular en el suelo, resulta:

$$ST_{precoz}=10\log_{10}\left\{\frac{31200(T/V)\left(\exp(-0.276/T)-\exp(-1.38/T)\right)}{100/r^2+18}\right\}_{r=1m}= \tag{3}$$
$$=10\log_{10}\left\{(T/V)\left(\exp(-0.276/T)-\exp(-1.38/T)\right)\right\}+24.2\quad (dB),$$

El efecto de la reflexión en el suelo se evalúa teniendo en cuenta que la atenuación con la distancia por divergencia es aproximadamente 7 dB (correspondiente a $\sqrt{5}\,m$) lo que supone el 20% del valor correspondiente al sonido directo. La atenuación adicional debida a la absorción en el suelo se ha estimado como el 2% del sonido directo en todos los casos. Análogamente, sustituyendo en la ecuación (1) para los límites de $ST_{tardío}$, y las mismas consideraciones anteriores para el denominador, se obtiene la expresión:

$$ST_{tardío}=10\log_{10}\left\{\frac{31200(T/V)\left(\exp(-1.38/T)-\exp(-13.82/T)\right)}{100/r^2+18}\right\}_{r=1m} \tag{4}$$
$$=10\log_{10}\left\{(T/V)\left(\exp(-1.38/T)-\exp(-13.82/T)\right)\right\}+24.2\quad (dB),$$

Los valores de los parámetros de escena calculados de acuerdo con las ecuaciones (3) y (4) se han representado en la Figura 1 (líneas azules). Cabe comentar que es posible escribir las ecuaciones equivalentes a (3) y (4) partiendo del modelo de Barron [15], que se escribirán:

$$ST_{precoz}(Barron)=10\log_{10}\left\{(T/V)\exp(-0.04/T)\left(\exp(-0.276/T)-\exp(-1.38/T)\right)\right\}+24.2\quad (dB) \tag{5}$$

$$ST_{tardío}(Barron)=10\log_{10}\left\{(T/V)\exp(-0.04/T)\left(\exp(-1.38/T)-\exp(-13.82/T)\right)\right\}+24.2\quad (dB) \tag{6}$$

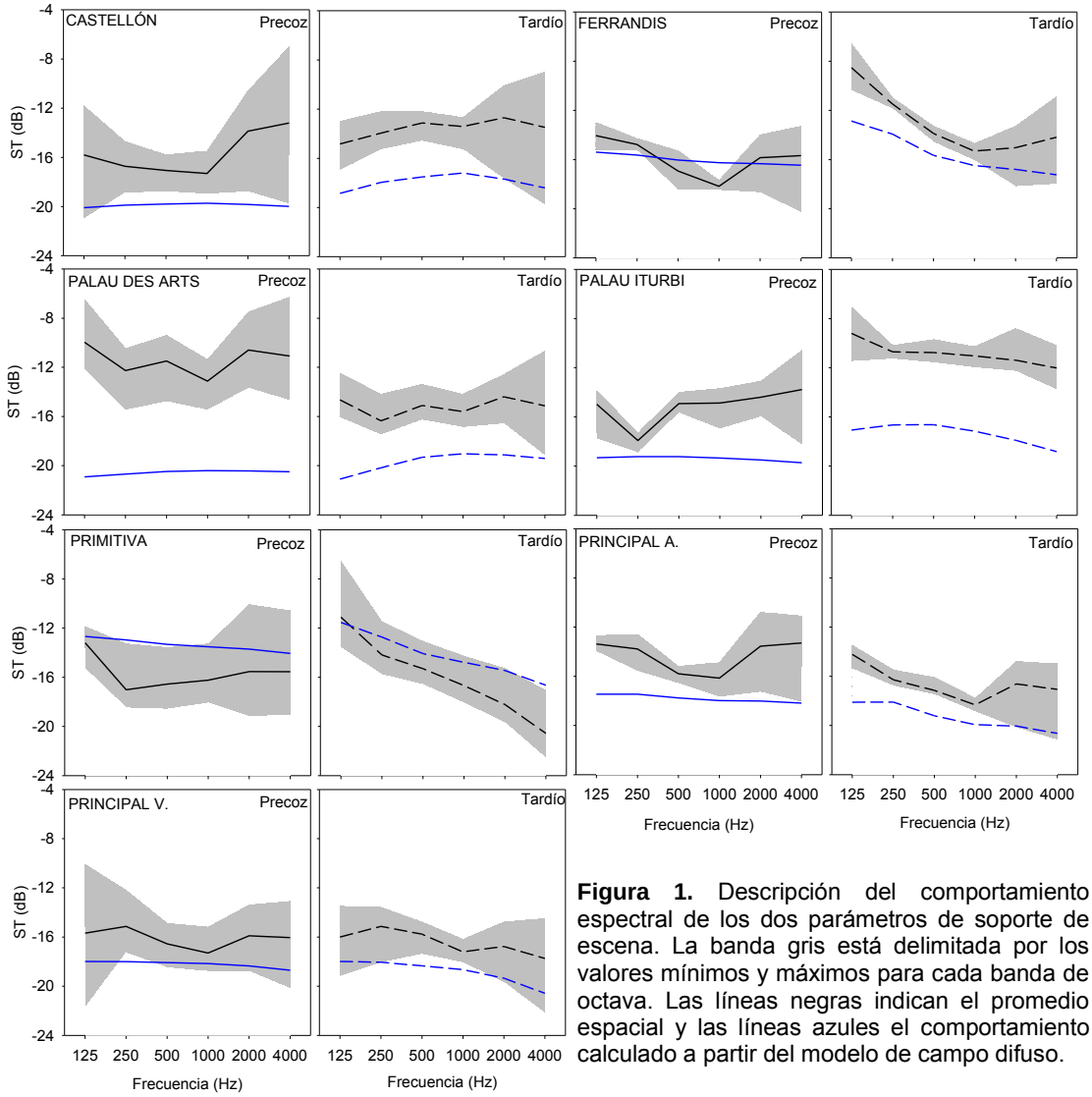



**Figura 1.** Descripción del comportamiento espectral de los dos parámetros de soporte de escena. La banda gris está delimitada por los valores mínimos y máximos para cada banda de octava. Las líneas negras indican el promedio espacial y las líneas azules el comportamiento calculado a partir del modelo de campo difuso.

Como era de esperar ambos modelos coinciden a distancias próximas a la fuente, ya que la exponencial adicional que aparece en las ecuaciones de Barron, en los valores extremos de la Tabla 2 son muy próximas a 1: exp (-0.04/2.53)= 0.98 y exp (-0.04/1.07)= 0.96.

En general la dependencia con la frecuencia de los parámetros de escena calculados teóricamente presentan un comportamiento más suave que lo correspondiente a los valores experimentales, y solo en las salas que son propiamente teatros de proscenio de tipología herradura o abanico es donde se aproximan los resultados experimentales a las previsiones de campo difuso: teatro de Paterna, Primitiva de Lliria, Principal de Valencia y Principal de Alicante.

También es importante señalar que, a excepción del teatro de la Banda Primitiva de Lliria, los resultados experimentales presentan valores superiores que los calculados teóricamente. En algunos casos las diferencias son apreciables (Auditorio de Castellón, ~2.5 dB menos para $ST_{precoz}$ y ~4 dB menos para $ST_{tardío}$, Palau des Arts ~7 dB menos para $ST_{precoz}$ y ~3 dB menos para $ST_{tardío}$ y en Palau sala Iturbi ~4.5 dB menos para $ST_{precoz}$ y ~6 dB menos para $ST_{tardío}$ a frecuencias medias). La razón de estas notorias diferencias se debe a la existencia de techos y superficies reflectantes que dirigen numerosas reflexiones tempranas a la zona de los músicos.

**Valores Promedios Espectrales de los Parámetros de Escena**

La Tabla 3 muestra los valores aritméticamente promediados, para las octavas 0.25-2 kHz, de los parámetros de escena en las diferentes posiciones de medida de las 7 salas estudiadas. En algunos casos las diferencias entre unas y otras posiciones en la sala exceden los 2 dB de umbral diferencial sugerido para $ST_{precoz}$ [8]; en particular este hecho ocurre en la sala TBP, donde al incluir muchos puntos de medida se pueden presentar grandes diferencias en el entorno de los mismos. En todos los recintos los resultados están dentro del rango típico que especifica la norma ISO 3382-1 [7]: (-24 dB; -8 dB) para $ST_{precoz}$ y (-24 dB; -10 dB) para $ST_{tardío}$.

Además, promediando espacialmente los resultados en los diferentes puntos de la escena, cada sala está caracterizada por un valor único de cada parámetro, dichos valores se muestran en la última columna de la Tabla 3. Para $ST_{precoz}$ los valores promedio están dentro del rango de -16.3 dB del TBP de Lliria y -11.9 dB de PAA. En cuanto a $ST_{tardío}$ el rango de variación es de -17.1 dB del TPA y -11 dB del PMI. De acuerdo con numerosos experimentos subjetivos, Gade [6] estima que valores de $ST_{precoz}$ en el rango -13 dB y -11 dB corresponden a situaciones de conjunto satisfactorias, también Chiang *et al.* [16] señalan en su trabajo de campo un valor óptimo de ~-12 dB para $ST_{precoz}$. Por otra parte Ueno *et al.* [17], concluyen de sus experimentos de laboratorio con orquestas, que un nivel muy alto de la energía reflejada precoz, correspondiente a $ST_{precoz}$ en el rango -10 dB a -7 dB, era displicente para la mayoría de los músicos porque enmascaraba la reverberación, no contribuyendo al apoyo. Si atendemos a esas consideraciones solo PAA se sitúa en el rango óptimo.

Para $ST_{tardío}$ no existen estudios de percepción subjetiva con músicos relativos a sus valores óptimos, y las escasas valoraciones existentes no son comparables debido a las redefiniciones sufridas en los límites de integración de la energía reflejada en la ecuación (1). En relación al balance óptimo entre los niveles reflejados precoz y tardío las discusiones en la literatura son muy cualitativas, y a veces contradictorias, estimándose que valores de $ST_{tardío}$ superiores o similares a $ST_{precoz}$ pueden causar enmascaramiento de parte del sonido reflejado inicial, perjudicando la sensación de conjunto de los músicos. En estos recintos valencianos, a excepción de PAA y TPA, el resto presenta valores de $ST_{tardío}$ iguales o superiores a $ST_{precoz}$.

Estas consideraciones respecto al balance entre los dos niveles, de tal forma que haya contribuciones beneficiosas para el soporte a los músicos, tanto en relación al conjunto como a la percepción de la respuesta acústica de la sala, deben tomarse con reservas. Ya Gade [10] señala que la investigación en el campo de la acústica de la escena es por el momento muy insuficiente y dispersa, y requeriría aunar esfuerzos para reunir datos en más salas, relativos a la percepción de los músicos, y medidas de sus parámetros acústicos de escena objetivos. Si

**Tabla 3.** Valores promediados espectralmente para cada punto de medida, $ST_{precoz}$ (fila superior) y $ST_{tardío}$ (fila inferior) en dB, en los diferentes puntos de las escenas y promedio espacial para cada sala.

| Sala | Posiciones de medida | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | Promedio |
| APC | -16.7 | -17.2 | -14.9 | -16.2 | -17.3 | -14.6 | -18.6 | -14.6 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-16.2** |
| | -13.0 | -13.4 | -12.4 | -13.1 | -13.7 | -12.4 | -15.7 | -12.7 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-13.3** |
| GTF | -17.0 | -16.0 | -16.8 | -16.0 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-16.4** |
| | -14.7 | -13.6 | -13.5 | -13.9 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-13.9** |
| PAA | -10.2 | -10.7 | -10.2 | -11.0 | -12.5 | -13.2 | -13.3 | -13.9 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-11.9** |
| | -15.2 | -14.9 | -14.1 | -13.8 | -15.6 | -16.2 | -16.8 | -16.5 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-15.4** |
| PMI | -15.4 | -15.2 | -16.8 | -14.8 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-15.5** |
| | -11.4 | -11.5 | -11.0 | -10.0 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-11.0** |
| TBP | -17.1 | -17.1 | -16.5 | -16.5 | -17.1 | -16.6 | -16.5 | -14.4 | -15.7 | -18.1 | -16.8 | -16.7 | -15.8 | -13.9 | **-16.3** |
| | -16.6 | -15.8 | -15.4 | -16.0 | -17.1 | -16.7 | -16.7 | -15.1 | -16.5 | -17.2 | -16.5 | -16.9 | -15.1 | -14.0 | **-16,1** |
| TPA | -13.9 | -14.9 | -15.3 | -15.2 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-14,8** |
| | -16.9 | -17.2 | -18.0 | -16.3 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | **-17,1** |
| TPV | -15.7 | -15.8 | -14.8 | -15.8 | -15.6 | -17.6 | -16.1 | -16.7 | -15.8 | -16.3 | -18.1 | -16.4 | --- | --- | **-16,2** |
| | -15.5 | -15.9 | -15.5 | -15.8 | -15.4 | -17.0 | -15.5 | -17.6 | -15.7 | -17.2 | -17.3 | -16.5 | --- | --- | **-16,2** |

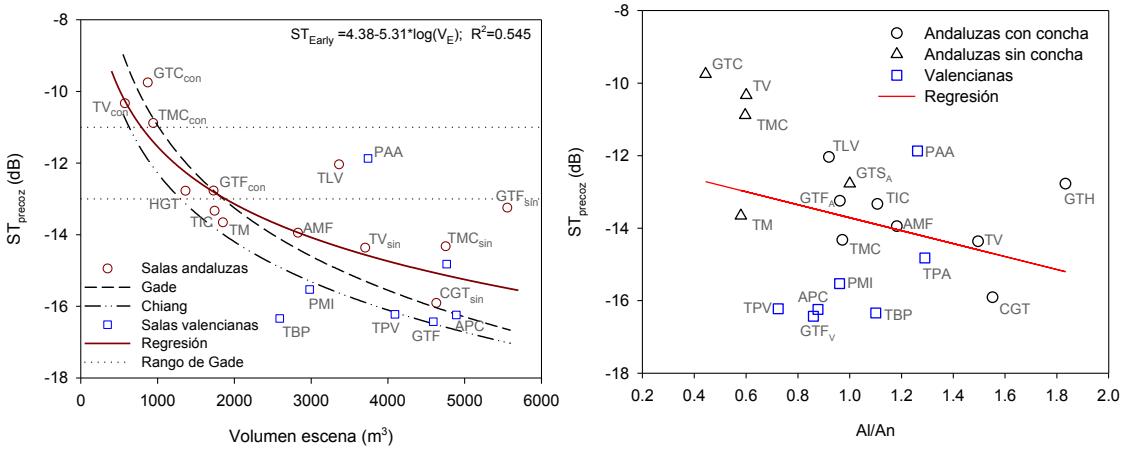



**Figura 2**. (a) $ST_{precoz}$ en función del volumen de la escena. Las líneas horizontales muestran el rango óptimo de Gade. (b) $ST_{precoz}$ en función del cociente Alto/Ancho de las escenas.

bien con un amplio acuerdo sobre el número mínimo de preguntas a incluir en el cuestionario a los músicos y el número mínimo de parámetros objetivos a valorar en las escenas.

### Parámetros de Escena versus Factores Geométricos

El parámetro $ST_{precoz}$ es muy sensible a cambios en la secuencia de reflexiones precoces, por consiguiente es de esperar que presente correlaciones altas con las variables que describen la geometría del escenario. En la Figura 2(a) se representa el valor promedio de $ST_{precoz}$ en función del volumen de la escena. En la misma grafica se incluye un conjunto de teatros y auditorios andaluces, algunos en la doble configuración con y sin concha orquestal en la escena. La regresión de tipo logarítmico, con todos los datos, corresponde a la ecuación (7):

$$ST_{precoz} = 4.38 - 5.31 \log_{10}(V_E); \quad R^2 = 0.545; \qquad P = 0.0002 \tag{7}$$

que da lugar a un descenso de 1.6 dB al doblar el volumen, con las salas PAA y TBP que se apartan especialmente del comportamiento descrito por la ecuación. Esta regresión es semejante, aunque más débil por la variada tipología de las salas, a la que obtiene Gade [18] para un conjunto de salas de concierto europeas y Chiang et al. [19] para un conjunto de escenarios de dimensiones más reducidas que los tratados aquí, que también aparecen en la gráfica.

En la Figura 2(b) se representa el valor promedio de $ST_{precoz}$ en función del cociente Al/An del escenario, el TPA es el teatro valenciano más próximo a la línea de regresión, en la que también se han incluido los andaluces, integrándose en el grupo con los que mantiene similitud tipológica. Es posible inferir de ambas representaciones que $ST_{precoz}$ aumenta si el volumen de la escena disminuye y que también aumenta si la razón Al/An disminuye. Esta última tendencia es contraria a la que obtiene Dammerud et al. [14], en cuyo trabajo obtiene una fuerte correlación positiva de esta razón con el atributo subjetivo de Impresión Acústica Global (OAI) por parte de los músicos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de los parámetros de escena de siete salas escénicas de la Comunidad de Valencia. En función de la frecuencia, los parámetros presentan gran variabilidad espacial para los diferentes puntos de medición. Sus valores promediados espacialmente también son más variables en su comportamiento frente a la frecuencia que los valores teóricos, calculados a partir del modelo de campo sonoro difuso. En las salas que son propiamente teatros de proscenio los cálculos teóricos se asemejan a los experimentales. En los auditorios se obtiene gran desviación y mayores valores de los paráme-

tros de escena experimentales que teóricos, debido a la presencia de elementos reflectantes y difusores en paredes y techos. Se discuten los valores promediados espectralmente de los parámetros en relación a los valores óptimos propuestos en la literatura y al balance de los dos niveles en los espacios escénicos. Finalmente, se estudian estos valores promediados espectralmente en función del volumen del escenario y de la razón alto/ancho, incluyendo datos de recintos de otra región española y de otros países, de variada tipología.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la dirección de los teatros y auditorios los permisos concedidos para la realización de las medidas. Esta comunicación es parte del trabajo realizado en los proyectos de investigación I+D+i con referencias BIA 2012-36896 y BIA2014-56755-P.

## REFERENCIAS

[1] A.H. Marshall, D. Gottlob, H. Alrutz. “Acoustical conditions preferred for ensemble”. J. Acoust. Soc. Am. 64, 1437-1442 (1978).

[2] M. Barron. “The Gulbenkian Great Hall. Lisbon II: An acoustic study of a concert hall with variable stage”. J. Sound Vib. 59, 481-502 (1978).

[3] J.J. Dammerud, M. Barron, E. Kahle. “Objective assessment of acoustic conditions for symphony orchestras”. Build. Acoust. 18, 207–219 (2011).

[4] H. Arau. “Is Gade’s “support” parameter STearly a sure method to forecast stage acoustics?”. Proceedings of Internoise 2010, Noise and sustainability, Lisbon, Portugal (2010).

[5] A.C. Gade. “Investigations of musicians’ room acoustic conditions in concert halls. Part I: Method and laboratory experiments”. Acustica **69,** 193-203 (1989).

[6] A.C. Gade. “Investigations of musicians’ room acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results”. Acustica **69**, 249-262 (1989).

[7] UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2010).

[8] J.Y. Jeon, M. Barron. “Evaluation of stage acoustics in Seoul Arts Center Concert Hall by measuring stage support”. J. Acoust. Soc. Am. **117**, 232-239 (2005).

[9] A.C. Gade. “Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms”. Proceedings of the 14th ICA Beijing, (1992).

[10] A.C. Gade. “Acoustics for symphony orchestras; status after three decades of experimental research”. Build. Acoust. **18,** 181–206 (2011).

[11] J.J. Dammerud, M. Barron. “Attenuation of direct sound and the contributions of early reflections within symphony orchestras”. J. Acoust. Soc. Am. **128**, 1755–1765 (2010).

[12] A.R.H.C. Wenmaekers, C.C.J.M. Hak, L.C.J. van Luxemburg. “On measurements of stage acoustic parameters: Time interval limits and various source–receiver distances”. Acta Acustica-Acustica **98**, 776 – 789 (2012).

[13] S. Girón, T. Zamarreño, M. Galindo. “Experimental study of Support parameters in auditorium and proscenium stages”. Acta Acustica-Acustica. **96**, 1026-1041 (2010).

[14] J.J. Dammerud, M. Barron. “Concert hall stage acoustics from the perspective of the performers and physical reality”. Proceedings Inst. of Acoustics **30** (2008).

[15] M. Barron, L.J. Lee. “Energy relations in concert auditoriums I”. J. Acoust. Soc. Am. **84**, 618-628 (1998).

[16] W. Chiang, S-T Chen, C-T Huang. “Subjective assessment of stage acoustics for solo and chamber music performances”. Acta Acustica-Acustica. **89,** 848–856 (2003).

[17] K. Ueno, H. Tachibana. “Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using a 6-channel sound simulation system”. Acoust. Sci. & Tech. **24**, 130–138 (2003).

[18] A.C. Gade. “An acoustical survey of eleven European concert halls - a basis for discussion of halls in Denmark”. The Acoustics Laboratory, Tech. Univ. of Denmark, [Report No.44], (1989).

[19] W. Chiang, Y. Shu. “Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls”. Appl. Acoust. **64,** 863-884 (2003).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE ACÚSTICA
VIRTUAL Y AMBISONICS

# ACÚSTICA ARQUEOLÓGICA: RECONSTRUCCIÓN DE LA CASA DE LA OLIVERA, TEATRO VALENCIANO DEL SIGLO XVII

PACS: 43.55.Ka

Segura, Jaume; Barba, Arturo; Planells, Ana; Cerdá, Salvador; Cibrián, Rosa; Giménez, Alicia.
Grupo de Investigación en Acústica Virtual
Universitat Politècnica de València-Universitat de València. Edificio 5D,
Camino de Vera s/n
46022 Valencia-Spain.
E-mail: acusvirt@upv.es

## ABSTRACT

Virtual reality and virtual acoustics are powerful tools for a wide range of applications in different scientific and technological fields. Lately, there are many contributions applying these technologies to heritage reconstruction and archaeological acoustics. The application discussed in this paper is the virtual acoustic reconstruction of the “Corral de la Olivera”, which is the name given to the earliest playhouse built in Valencia in 1584. It was the first building for theatrical performances in Valencia. In 1618, the original building was demolished to rebuild in the same site a new theatre more in line with the actual requirements of capacity and performing demands. The “Nova Olivera”, remained in use until its demolition in 1750.

This paper includes a reconstructed model of this last room based on the existing documentation and studies, and an acoustic analysis and auralization of it, which allowed us to reconstruct virtually the last theatre’s sound.

## RESUMEN

La realidad virtual y la acústica virtual son potentes herramientas que permiten un amplio abanico de posibles aplicaciones en diferentes ámbitos científico-tecnológicos. Últimamente son muchas las aportaciones que se están realizando en el ámbito de la reconstrucción del patrimonio y de la acústica arqueológica aplicada en este ámbito. La aplicación que tratamos en este artículo es la reconstrucción acústica virtual de la Casa o Corral de la Olivera, que es el nombre con el que se conocía a la primitiva casa de Comedias que se construyó en Valencia en 1584. Se trata del primer edificio construido expresamente para la realización de representaciones teatrales en la ciudad de Valencia y uno de los primeros de España. En 1618, se derribó el edificio primitivo para reedificar en el mismo solar un local teatral más acorde con las exigencias y necesidades de aforo y escénicas del momento. La Nova Olivera se mantuvo en uso hasta su demolición en 1750.

En este trabajo se ha construido un modelo de la Nova Olivera, en base a la documentación existente y a diversos estudios históricos realizados al respecto, y se ha llevado a cabo un análisis acústico y la correspondiente auralización, que nos ha permitido reconstruir virtualmente el sonido del teatro en su última época.

## INTRODUCCIÓN

### El primer teatro en Valencia

Las primeras representaciones teatrales en la ciudad de Valencia se realizaban de manera ambulante en espacios exteriores o lugares improvisados sin un acondicionamiento específico. No fue hasta el siglo XVI cuando se construyó el primer edificio diseñado para este fin promovido por el Hospital de Valencia al que le había sido concedido un privilegio por el cual ejercía el monopolio de las actividades teatrales en la ciudad.

La documentación sobre esta primera casa de representaciones es escasa y se conoce poco más que su existencia y ubicación en la actual calle Comedias. La primitiva casa de la Olivera estuvo en funcionamiento durante 34 años, hasta que el Hospital decidió derribarla y construir una nueva, de mayores dimensiones, y que se ajustara mejor a los requerimientos funcionales de la época. Para ello se adquirieron algunas propiedades colindantes y se levantó la Nueva Casa de la Olivera [1].

### La Nueva Olivera

Construido en 1618, el edificio tenía una geometría en planta sensiblemente circular con una anchura de unos 15 metros y una profundidad de 13 metros. Disponía de planta baja y dos alturas y se encontraba cubierto. Tenía capacidad para unos 1800 espectadores. La documentación existente incluye estudios detallados sobre el aforo [2] y un plano esquemático de su distribución en planta del año 1678. (Fig. 1). La planta baja contaba con sillas en las que se ubicaban la nobleza, clases para-nobiliarias y clero, bancos detrás de estas y unas gradas al fondo. La primera planta estaba dividida en 20 aposentos que constituían las localidades más caras y lujosas del teatro. Por último, la segunda planta conocida como “cazuela” estaba reservada exclusivamente a las mujeres. Cada una de las zonas contaba con un acceso propio independiente.

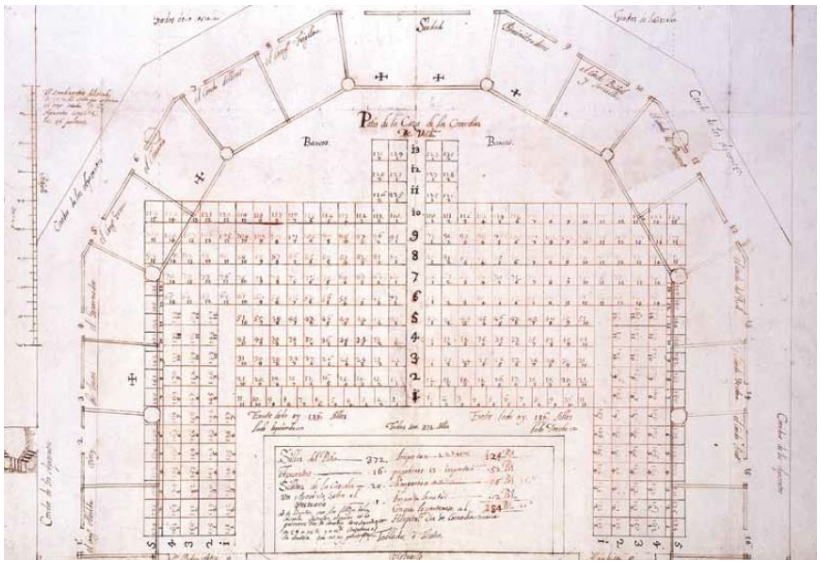


Fig 1. Planta esquemática de la Casa de Comedias de Valencia en el año 1678, anónimo, Valencia, 1678 (Archivo General y Fotográfico de la Diputación de Valencia)

El escenario estaba formado por un único tablado rectangular que el público rodeaba por tres de sus lados, detrás se encontraba el vestuario de los actores y sobre éste un balcón corrido, al que se accedía por dos escaleras laterales en el exterior del vestuario, llamado “balcón de las apariciones” y utilizado para la representación de personajes abstractos o figuras morales. Esta Casa de Comedias permaneció en uso hasta 1715 cuando, debido a su mal estado, se decidió demolerla y construir una nueva que se mantuvo hasta 1750.

## METODOLOGÍA

### Construcción del modelo.

Se ha elaborado un modelo simplificado de la Nueva Olivera (Fig. 3), utilizando los software AutoCAD y SketchUp, a partir de los planos recogidos en la tesis de Jose Luis Ros [3]. Esta documentación incluía plantas de las tres alturas, sección y una axonometría (Fig. 2), que se han contrastado y completado con las descripciones de los textos para determinar la posible geometría del espacio interior. Por otra parte, se ha consultado el libro de administración de obra conservado para identificar los materiales con los que fue construido el teatro y asignar a las superficies las absorciones correspondientes.

Así se ha determinado que los seis grandes pilares que soportaban la cubierta eran de piedra de Godella, mientras que los pequeños estaban construidos con ladrillo y después revestidos imitando piedra. Las paredes eran de ladrillo revestido con yeso y los forjados y cubierta de vigas de madera y revoltón. El teatro contaba con pavimentos de baldosa cerámica en todas las plantas y barandillas de hierro en las superiores. Las gradas en las que se aposentaban los espectadores eran de madera [4].

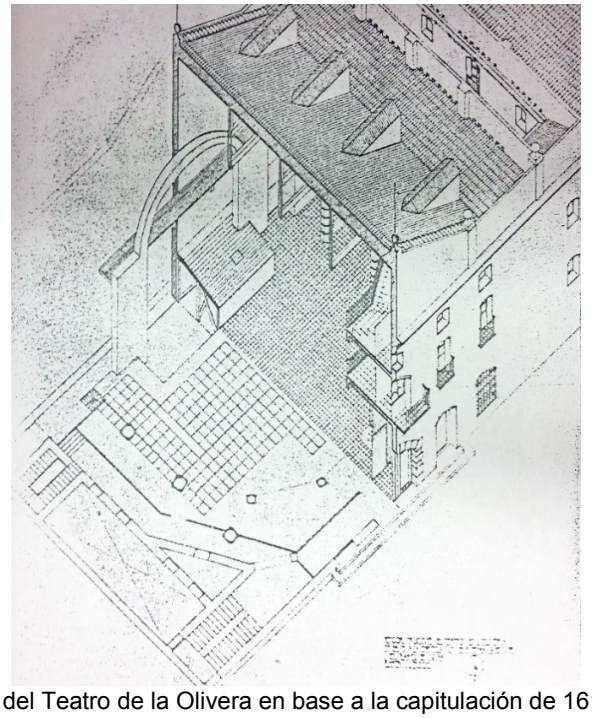


Fig 2. Reconstrucción del Teatro de la Olivera en base a la capitulación de 1618 y el plano de 1678. Axonometría. [3]

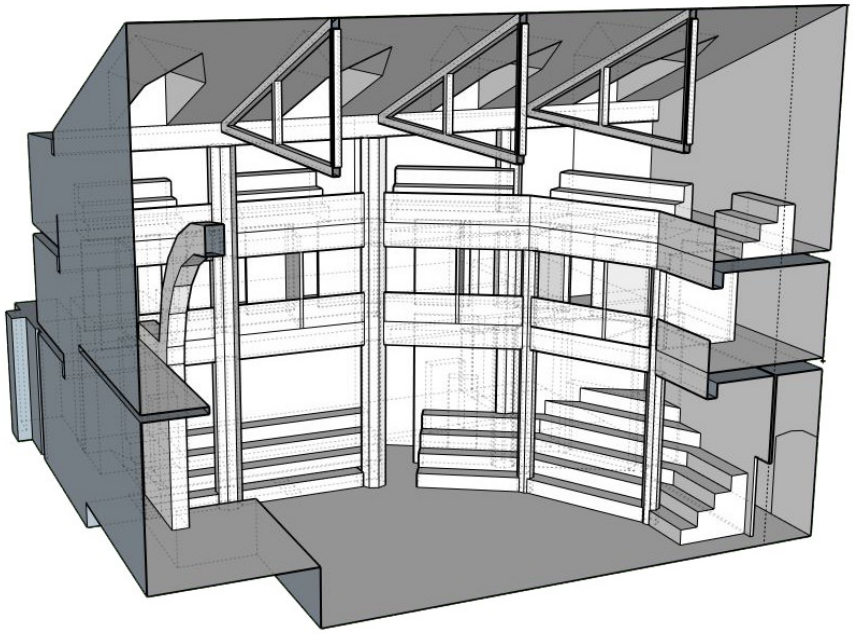


Fig 3. Modelo de la Nueva Casa de la Olivera

**Materiales**

La determinación de los materiales con los que se construyó este teatro es una tarea compleja debido a que éste no existe en la actualidad. Sin embargo, se ha encontrado el libro de construcción que se usó en la rehabilitación del teatro en 1678 [4]. Esta referencia nos ha permitido determinar las tipologías de material y en base a la biblioteca de ODEON hemos asignado los materiales a cada una de las superficies del modelo.

La tabla 1 muestra los valores de los coeficientes de absorción que se han usado en la simulación acústica de este modelo.

Tabla 1. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en la reforma de 1618 [4].

| | | Absorciones | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nro Mat ODEON | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| Pilar grande piedra | 9010 | 0,19 | 0,23 | 0,43 | 0,37 | 0,58 | 0,62 |
| Pilar pequeño ladrillo | 1010 | 0,14 | 0,28 | 0,45 | 0,9 | 0,45 | 0,65 |
| Forjado madera | 10007 | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,10 |
| Gradas madera | 3020 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 |
| Cubierta madera | 10007 | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,10 |
| Escenario | 3000 | | | | | | |
| Pavimento cerámico | 2002 | 0,21 | 0,54 | 0,74 | 0,34 | 0,28 | 0,42 |
| Paredes de ladrillo con yeso | 1005 | 0,08 | 0,09 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,24 |
| Barandilla de hierro | 4048 | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |
| Techo (madera) | 3065 | 0,19 | 0,14 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,05 |

La figura 4 muestra las localizaciones de las fuentes estudiadas en este análisis previo de la acústica en este teatro. Hemos ubicado 6 fuentes en el patio de butacas y 2 fuentes en los palcos del segundo piso.

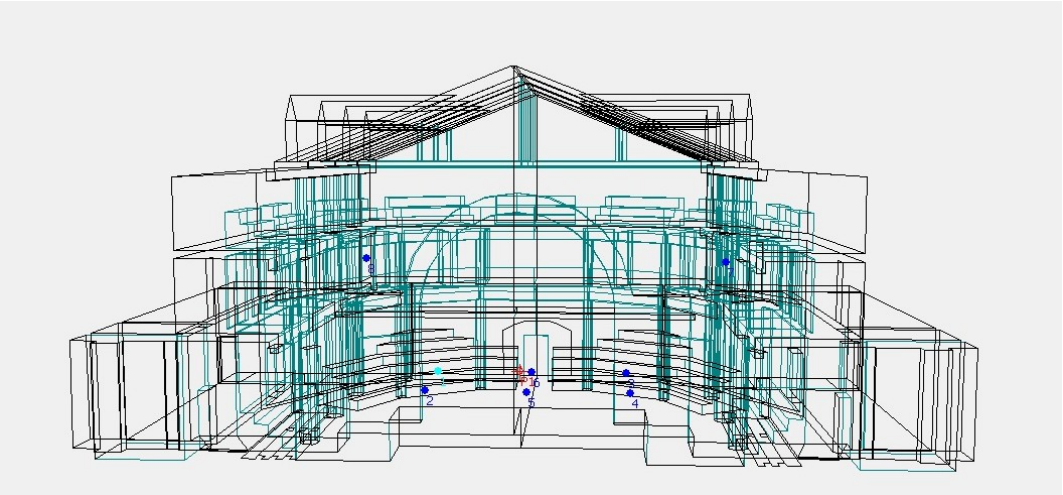


Fig 4. Localización de los receptores estudiados.

De acuerdo con [5], la distribución social también se plasmaba en la distribución en los asientos. La figura 5 muestra un gráfico de esta distribución según este estudio.

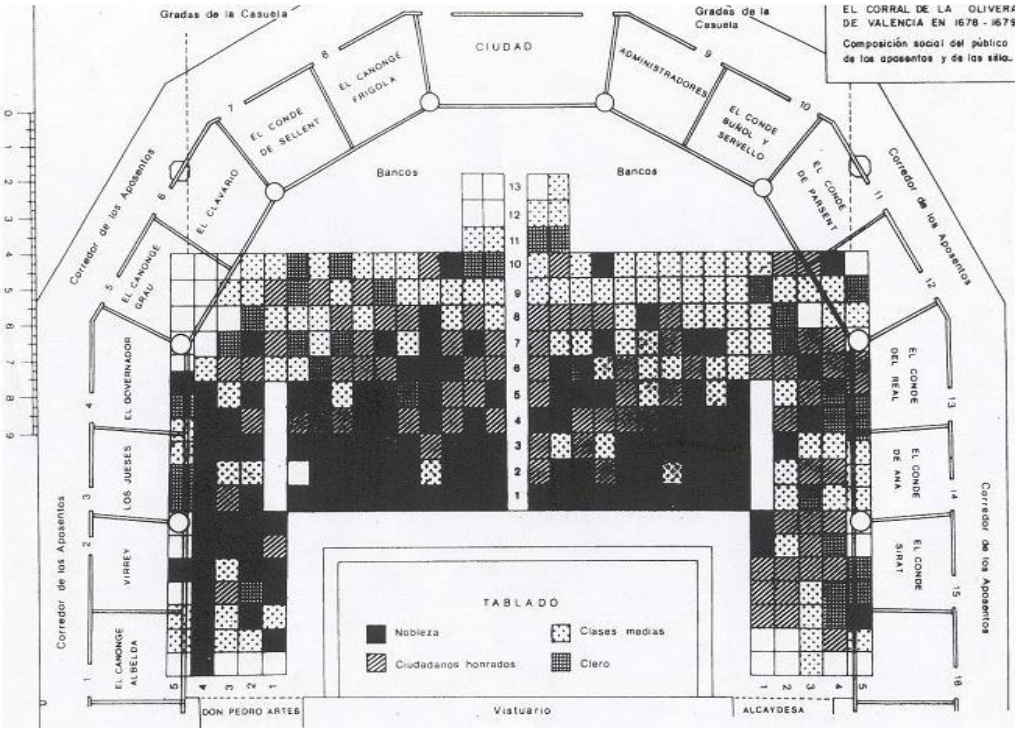



Fig 5. Distribución de localidades y segmentos sociales en la Casa de Comèdies de la Olivera, de Valencia [5].

Analizaremos, por tanto, la distribución de STI en la platea para relacionar la posible concentración de nobles con la calidad de percepción.

**Auralización**

Para la realización de la auralización hemos secuenciado un fragmento de un minuto de la obra "El Caballero de Olmedo" de Lope de Vega. Se ha obtenido un fichero de audio con la voz

sintetizada (usando la herramienta Read Out Loud Text-to-Speech de Adobe) de los diferentes personajes secuenciados y se ha auralizado en las posiciones que se observan en la figura 4.

## RESULTADOS

### Simulación acústica

Para la simulación acústica se ha utilizado el software ODEON. Con él hemos realizado pruebas acústicas en una retícula en el patio de butacas utilizando una retícula de 0,5 m de granularidad y a 1,2 m de altura.

Tabla 2. Parámetros acústicos promedios de la sala.

| | | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EDT (s) | Avg | 1,25 | 1,15 | 1,03 | 1,22 | 1,12 | 0,88 |
| RT30 (s) | Avg | 1,35 | 1,24 | 1,06 | 1,30 | 1,23 | 0,97 |
| D50 | Avg | 0,45 | 0,47 | 0,55 | 0,51 | 0,45 | 0,51 |
| C80 (dB) | Avg | 2,2 | 2,8 | 4,0 | 3,0 | 2,5 | 4,3 |
| Ts (ms) | Avg | 86 | 78 | 62 | 76 | 78 | 62 |
| LF80 | Avg | 0,272 | 0,274 | 0,240 | 0,258 | 0,272 | 0,268 |

La figura 6 muestra el modelo con la asignación de materiales hecha desde la parte posterior de la platea del teatro (en esta imagen no hay sillas en la platea ni en los palcos).



Fig 6. Modelo geométrico interior (las zonas con el mismo coeficiente de absorción muestran el mismo color).

La figura 7 muestra el cálculo del STI realizado a partir de la simulación acústica del modelo presentado la distribución en la platea del teatro (como en el modelo anterior, no se ha tenido en cuenta la presencia de sillas ni público en la platea ni en los palcos). En esta figura observamos una concentración de localidades con un STI bueno en la zona central y abriéndose en abanico, lo cual explica de manera bastante clara la concentración de nobles en esta zona.

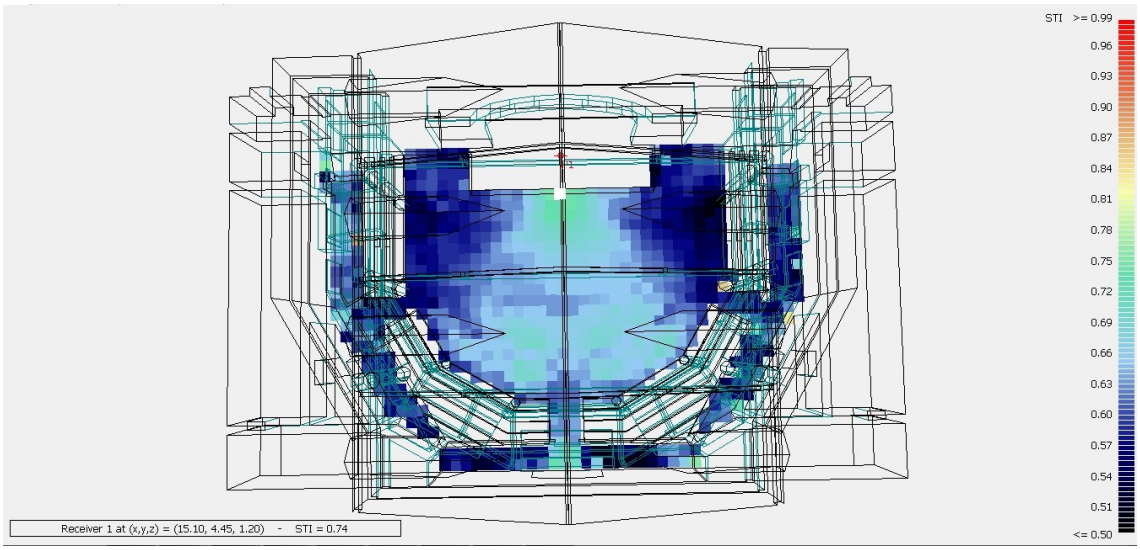



Fig 7. Distribución de STI en el patio de butacas.

**Auralización**

A partir de la obtención de las respuestas impulsivas en las 8 diferentes posiciones consideradas, se ha realizado la auralización y en los enlaces referenciados [5] se presentan los resultados en las posiciones 5 (centro de la platea) y 8 (palco del segundo piso). En esta última posición, el receptor está muy próximo a la pared del palco por lo que hay cierto efecto de bloqueo sonoro.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una reconstrucción de la Casa de Comedias de la Olivera de Valencia (que estuvo ubicada en la actual calle Comedias). A partir del modelo y de la documentación sobre los materiales utilizados en la reforma que se hizo en 1618, debido a un incendio, se ha realizado el estudio acústico.

Se observa que el teatro, aunque presenta un tiempo de reverberación (RT30) un poco alto para su uso (hemos de tener en cuenta que no hemos considerado la presencia de público), tiene un parámetro de definición (D50) adecuado para el habla. Además, la distribución de STI que muestra la figura 6 muestra una situación acústicamente buena, y muy buena en la zona central de la platea. Esto concuerda en cierta medida con la distribución social que ocupaba las distintas zonas del teatro [5].

También se presentan unas auralizaciones de una obra de Lope de Vega, que residió en Valencia durante una temporada.

## REFERENCIAS

[1] Barba A., Giménez A.: El teatro principal de Valencia: acústica y arquitectura escénica. Ed. Generalitat Valenciana, Universitat Politècnica de València, 2011.
[2] Mouyen, J.: Comedias y comediantes. Estudios sobre el teatro clásico español, Valencia, Universitat de València (Dpto. Filología Española), 1991.
[3] Ros J.L.: L'efímer en la formació del barroc valencià, 1599-1632. Tesis doctoral, 1981.

[4] Llibre de la Administració de la Obra de la Casa de la Comedia. Archivo General y Fotográfico de la Diputación de Valencia, fondos del Hospital General, sección Teatro, serie Obras. Referencia HG.VIII.2

[5] Mouyen, J: «Las Casas de Comèdies de Valencia» (en VV.AA., Teatros del Siglo de Oro: Corrales y Coliseos en la Península Ibérica. Cuadernos de Teatro Clásico, n.º 6, 1991, pp. 91-122).

[6] Lope-Olivera, posición 5: https://goo.gl/4LzKfK (Visitada: 18/09(2015) y Lope-Olivera, posición 8: https://goo.gl/4MoKNp (Visitada: 18/09/2015)

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación BIA2012-36896. Los autores también desean agradecer a los profesores Joan Oleza y Teresa Ferrer del Departament de Filologia Hispànica de la Universitat de València su interés y apoyo en esta investigación.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# UNCERTAINTIES IN ROOM SIMULATIONS

PACS: 43.55.Ka

Vorländer, Michael; Guski, Martin
Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, Kopernikusstr. 5, 52074 Aachen, Germany
mvo@akustik.rwth-aachen.de

## ABSTRACT

Room simulation requires input data of the room model and the boundary conditions. Uncertainties caused by user-dependent choices have been investigated in previous work. In this paper the influence of specific settings in the algorithmic details such as the number of rays or the temporal resolution, etc. will be studied by calculating energy room impulse response under the condition of variation of such settings. The statistics of the input variables and corresponding output standard deviations concerning room acoustics parameters (reverberation time, strength, clarity, etc.) will be presented, and possible guidelines for robust usage of algorithms will be discussed.

## RESÚMEN

Simulación de acústica de salas requiere como datos de entrada el modelo de la sala y las condiciones de contorno. Las incertidumbres causadas por las decisiones que dependen del usuario se han investigado en trabajos anteriores. En este trabajo la influencia de la configuración específica en los detalles algorítmicos tales como el número de rayos o la resolución temporal, etc., serán estudiados calculando la energía de la respuesta al impulso de la sala bajo la condición de variación de tales configuraciones. Se presentarán las estadísticas de las variables de entrada y las correspondientes desviaciones estándar como variables de salida relativas a los parámetros de acústica de la sala (tiempo de reverberación, fuerza, claridad, etc.), y se discutirán las posibles directrices para el uso de algoritmos robustos.

## 1. INTRODUCTION

Room acoustic simulations are usually based on models of geometrical acoustics such as image sources and ray tracing (Vorländer 2008). Many activities in research and development were reported in publications, and they basically focus on the problem of simulating the important early reflections in the room impulse response (Savioja and Svensson 2015). For the later part, the “diffuse reverberation tail” several alternatives exist, which span from simple stochastic diffuse decay processing to full ray tracing or radiosity. In between, often a mixing time or transition time is suggested to switch from one algorithm to the next (Jeong et al. 2010).

What is not known generally is the dependence of details in the late response on settings in ray tracing. This might introduce differences of results from repeated simulations with the same settings by just changing one parameter at a time, for example the receiver radius, the size of the temporal bins, the number of rays, etc.

In this contribution it is studied how theoretically predicted uncertainties compare with results from computer experiments.

## 2. FUNDAMENTALS – STATE OF THE ART

Differences in results from simulations with geometrical acoustics are caused by the choice of basic setting such as the transition time, the number of rays, the temporal and spatial resolution of the receiver. Also, these software parameters influence the computation time and are thus of interest if compromises between accuracy and effort must be found.

### 2.1. Fundamentals of Ray Tracing

There are two variants of ray tracing, which are often confused by users (Vorländer 2013). One (classical ray tracing) is used as a Monte Carlo approach, where the sound energy is distributed into space via rays (or particles) and later collected as temporal series of events in volume detectors. This method allows for inclusion of surface scattering and it directly delivers an impulse response in the time bins recorded at the receiver.

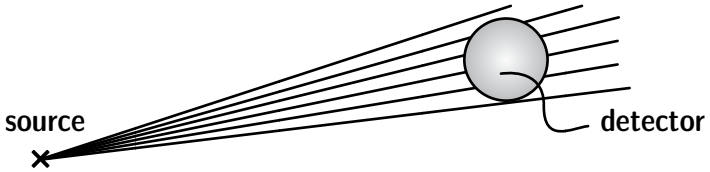



Figure 1: The principle of stochastic ray tracing. The energy-distance law ($1/r^2$) is alredy built-in by counting the rays hitting the receiver sphere.

The other (hybrid ray tracing – image source method) is used to identify paths of specular reflections by shooting rays (or beams, pyramids) in order to find image sources. The impulse response is created in post processing by analysis of the reflections paths, taking into account the spherical wave spread, the wall absorption, etc. This method cannot deall with scattering at all.

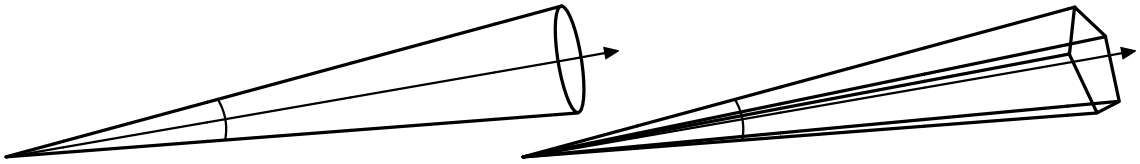


Figure 2: The principle of hybrid ray tracing. The energy-distance law ($1/r^2$) is introduced analytically by using the distance between the source and the receiver.

In both cases, the minimal required number of rays, $N_{\min}$, that is needed to resolve the cone of visibility for a spherical receiver with radius $r_d$ up to time $t$, is given by

$$N_{min} = \frac{4(ct)^2}{r_d^2} \qquad (1)$$

$c$ denotes the speed of sound.

In the second algorithm (reflection path analysis), this equation is crucial as it determines the lower limit of computation time. In the first algorithm (Monte Carlo ray tracing) it determines no hard limit but a certain probability limit. In the next chapter this aspect is further investigated.

### 2.2. Uncertainty analysis of ray tracing results (classical method)

In a room the rays are reflected and scattered, and the late decay is created from counting of rays hitting a receiver. This can be done in time bins, or in general terms collecting the total energy, or the immission level. A typical result is depicted in fig. 3. For stochastic ray tracing, which is used for estimation of reverberation tails, a diffuse field of rays (particles) could be assumed. The rays (“counting events”) coincide in temporal bins, depending on the specific

algorithms and parameters chosen in the program for detection and absorption. Note that this concept is identical with the concept of particles in a Geiger counter in particle physics.

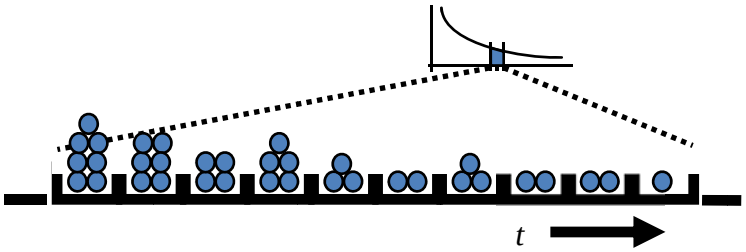



Figure 3: Counted events of rays hitting the receiver, recorded in time bins in the impulse response.

In this case a Poisson distribution can be used to estimate the counting rate, $k$, of events within a time bin $\Delta t$.

$$P(k) = \frac{\langle k \rangle}{k!} e^{-\langle k \rangle} \tag{2}$$

The variance of a Poisson distribution, $\sigma_k$, is the identical with the expectation value, $\langle k \rangle$:

$$\sigma_k^2 = \langle k \rangle \tag{3}$$

or expressed by the relative standard deviation

$$\sigma_k / \langle k \rangle = \frac{1}{\sqrt{\langle k \rangle}} \tag{4}$$

For example, if 100 events are counted in one time bin, the standard deviation is 0.1 (10%), in case of 10,000 events, the standard deviation is 0.01 (1%).

If the ray detection event is interpreted as corresponding to sound energy, or sound level, eq. (4) reads:

$$\sigma_{ETC}(t) = 4.34\, \sigma_k / \langle k \rangle \quad \text{dB} \tag{5}$$

In actual simulations, $k$ can be determined at runtime. This will be used in the next chapter in computer experiments. The expectation value, however, can also be calculated with the assumption of a diffuse field, in which $N$ rays are started at the source. Then holds

$$\sigma_{ETC} = 4.34 \sqrt{\frac{V}{N \pi r_d^2 c \Delta t}} \quad \text{dB} \tag{6}$$

which is actually independent of the running time, $t$, in the impulse response, see fig. 4.

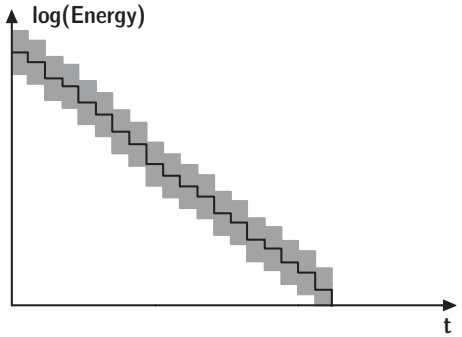



Figure 4: Estimated standard deviation (grey area) in the impulse response around the expectation value (black line).

Moreover, the total energy in the impulse response and correspondingly the parameters sound strength, $G$, and clarity, $C_{80}$, are uncertain with a standard deviation of

$$\sigma_G = 4.34\sqrt{\frac{A}{8\pi N r_d^2}} \tag{7}$$

with $N$ the number of rays used and $A$ the equivalent absorption area (according to Sabine's $A = 0.16\,V/T$). Depending on the choice of accuracy the required number of rays can be chosen so that a sufficient repeatability of the runs of the software is ensured. Obviously this depends on the room (on $A$). Small rooms with $A = 10\,\mathrm{m}^2$ require hardly 8 rays for $G$ or $C_{80}$ to be uncertain to not more than 1 dB, whereas large rooms with $A = 1{,}000\,\mathrm{m}^2$ require 750 rays. Here, it was chosen $r_d = 1\,\mathrm{m}$.

Going back to eq. (6) and discussing the uncertainties in the impulse response, it can be also set a demand on a maximum deviation, say 1 dB again, in the impulse response. The required number of rays for a room volume of 100 $m^3$ is then 1,760, and for a large room with $V = 10{,}000\,\mathrm{m}^3$, the required $N$ is 176,000. In these examples it is used $\Delta t$ = 1 ms and $r_d$ = 1 m. The equations re-arranged for the required $N$ read

$$N > \frac{4.34^2}{{\sigma_{ETC}}^2}\frac{V}{\pi r_d^2 c\Delta t} < 17.6\ V/\mathrm{m}^3 \tag{8}$$

and

$$N > \frac{4.34^2}{{\sigma_G}^2}\frac{A}{8\pi r_d^2} \approx 0.75\ A/\mathrm{m}^2 \tag{9}$$

The latter terms are valid for $\sigma = 1\,\mathrm{dB}$, $\Delta t = 1\,\mathrm{ms}$ , and $r_d = 1\,\mathrm{m}$.

In the next chapter computer experiments are described and the results discussed in comparison with the predicted standard deviations.

## 3. COMPUTER EXPERIMENTS

The software RAVEN is used (Pelzer et al. 2014). It consists of a combination of image source algorithms for the early specular part and ray tracing for the scattered and late specular part. It should be noted that RAVEN does not require a transition time but only a maximum image source order. The transition is intrinsically arranged by the scattering effects, which actually start at the first-order reflections.

The standard deviation in the late response is studied in dependence on the radius of the receiver, on the size of the time bins, and on the number of rays. The results are compared by observation of the sound energy, in dB, in the time bins, thus, in the energy time curve. Furthermore, the parameters strength and clarity are investigated.

For the experimental uncertainty analysis the image sources are deactivated, since the deterministic nature will not contribute to the statistical analysis. Two simple shoebox rooms with uniform material properties on all walls are taken as example. The walls have absorption coefficients of 0.2 and scattering coefficients of 1.0. One is a smaller room with volume of 293 $m^3$ (11m x 9 m x 3m). The source position is $p_s$ = (9.5, 3.5, 1.7) and 12 receivers are spread over the whole room. Another room is larger with a volume of 5525 $m^3$ (25m x 17m x13 m). The source is positioned at $p_s$ = (4, 7, 3) and 90 receivers are positioned in the room.

In Figure 5 it is shown the standard deviation of the energy of one single time bin at 40 ms in the first part of the impulse response. This refers to the example of the large room. The results are compared between theory (eq. 6) and simulation. The simulations were repeated 5000

times and the relative standard deviation of the sound energies in that time slot was calculated. This result agrees very well with the predicted value.

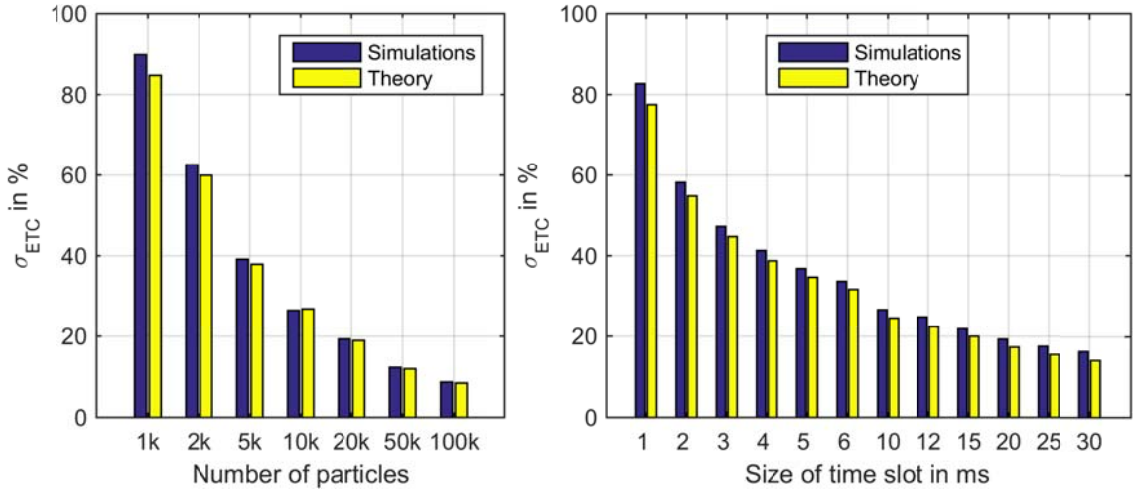



Figure 5: Relative standard deviation of energy in one time bin as function of the number of particles $N$ (left) and the size of time slot $\Delta t$ (right). It can be seen that simulation and theory match very well.

In figure 6 the time slots size and the receriver sizes are set to 25 ms and 0.6 m, respectively. For the two rooms the relative standard deviation is predicted (solid lines) and evaluated from the computer experiment in 5000 repetitions (broken lines).

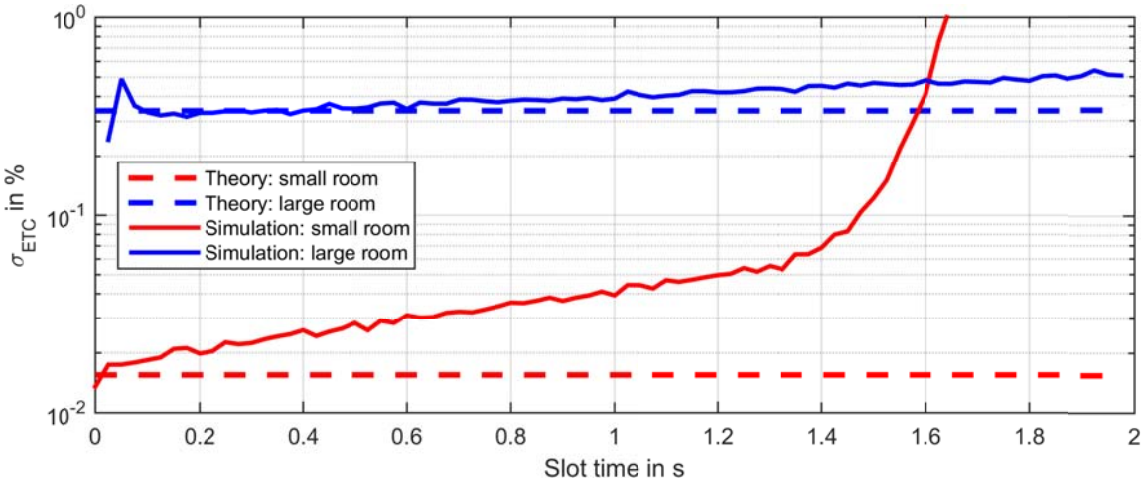



Figure 6: Relative standard deviation of the energy in the time slots as a function of time in the impulse response.

Figure 6 shows interesting features. For the large room (blue) the predicted standard deviation seems to match very well with the result from the computer experiment. There is a linear increase in the result of the computer experiment, however, which indicates a certain loss of rays. This interpretation is based on the trivial fact that the uncertainty increases with smaller numbers of rays. The same phenomenon is visible for the small room but with a steep increase at 1.5 s. A very interesting point in this discussion is that the loop termination in the software is not implemented as a time limit but as a minimum energy limit. The loop is stopped if a ray has suffered an energy loss larger than 130 dB, in fact this occurs on average at 1.5 s for the small room. The 130 dB level loss does not happen at about the same time for all rays paths but in more temporally distributed way, thus indicating a certain distribution of free paths. Some of the rays lose their energy more rapidly because the hit walls more often in time than others.

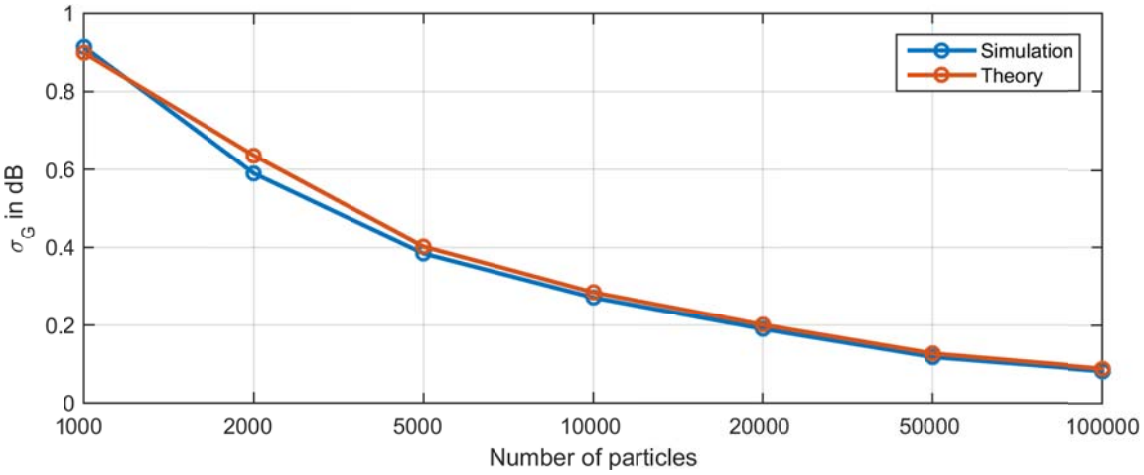



Figure 7: Deviation of sound strength $\sigma_G$ as function of the number of particles $N$.

Finally, figure 7 illustrates a very good match of the predicted standard deviation of the sound level (strength *G*, eq. 7) and the results from the computer experiment (1000 repetitions) in dependence on the number of rays.

## 4. CONCLUSION

Uncertainties can well be predicted for stochastic ray tracing. Using these equations, the required number of rays can be determined for an uncertainty limit of choice. Some results give also insight into the ray distribution as concerns the spatial and temporal ray history. The room shape and size has an impact on the specific free paths, whereas the uncertainty theory just involves the mean free path as one common value. There were exponentially increasing deviations from the predicted uncertainties. One interpretation is that according to the central theorem of statistics a Gaussian free path distribution holds for multiple reflections. The left branch of this distribution contains path lengths shorter than the mean value with a probability that the ray loses energy faster and thus reaches the energy limit earlier. Possibly it is advantageous to implement a time limit rather than an energy limit in the ray tracing algorithm. This observation and interpretation will have to be examined further in the progress of this investigation.

## REFERENCES

Jeong, C-H, Brunskog, J, Jacobsen F (2010) Room acoustic transition time based on reflection overlap. J. Acoust. Soc. Am. 127, 2733.

Pelzer, S, Aspöck, L, Schröder, D, Vorländer, M (2014) Interactive Real-Time Simulation and Auralization for Modifiable Rooms. Building Acoustics 21, 65.

Savioja, L, Svensson, UP (2015) Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. J. Acoust. Soc. Am. 138, 708.

Vorländer M (2008) Auralization - Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Springer-Verlag, Berlin.

Vorländer M (2013) Computer simulations in room acoustics – concepts and uncertainties. J. Acoust. Soc. Am. 133, 1203.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# Diseño y simulación de una sala de cine con formato de sonido DOLBY ATMOS

PACS: 43.35.Ka

Gómez Alfageme, J.J.; García González, S, Blanco Martín, E.; Sánchez Bote, J.L.
Universidad Politécnica de Madrid.
ETSIS de Telecomunicación, Ctra. Valencia km 7 – 28031 – Madrid;
Tel.+34 91 3367775; Fax +34 91 3319229; juanjose.gomez.alfageme@upm.es

## ABSTRACT

El sistema DOLBY ATMOS es una evolución del tradicional DOLBY DIGITAL, donde lo que se pretende es tratar a las fuentes sonoras como eventos sonoros independientes, lo que permitiría trabajar hasta con 128 señales de audio codificadas independientemente, en lugar de las 8 codificadas en DOLBY DIGITAL. Para ello, se simulará una sala de cine utilizando el programa de simulación electroacústica EASE en el que se dispondrá el sistema de sonido DOLBY ATMOS. Se seguirán las directrices sugeridas por DOLBY, creando la configuración de altavoces necesaria y obteniendo mediante simulación posteriormente los parámetros acústicos producidos por el sistema de sonido. La sala que se va a simular en la sala 6 de Kinépolis Ciudad de la Imagen en Madrid.

## INTRODUCCIÓN

Esta comunicación pretende exponer el estudio y simulación de la sonorización de la sala 6 del complejo de cines Kinépolis - Ciudad de la Imagen de Madrid mediante la utilización del sistema DOLBY ATMOS. Este sistema de sonido es la evolución del actual DOLBY DIGITAL 7.1 con la característica de que este sistema trata las señales de audio de manera independiente y añade altavoces situados en el techo de la sala con el fin de obtener mayor realismo a la par que mejorar la calidad del sonido.

Para el diseño y simulación de la sala y el sistema de sonido se utilizará la herramienta EASE 4.4, en el que se realizará el modelo geométrico de la sala a partir de los planos de la misma, teniendo en cuenta las dimensiones y materiales de la sala original.

Se dispondrá el sistema de sonido DOLBY ATMOS de acuerdo a las especificaciones de DOLBY y todo lo contenido en las normas DCI [1] y SMPTE [2]. Esto es, la colocación de los altavoces en la sala modificando su configuración tradicional 7.1, de tal manera que se ecualizarán y ajustarán los niveles en función de los requerimientos del sistema DOLBY ATMOS [3].

## EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE SONIDO EN CINE

La norma actual de cine digital especifica que el formato de sonido en cine es de hasta 16 canales de audio sin ningún tipo de codificación. La realidad es que la mayor parte de los cines han optado por el formato de DOLBY DIGITAL 7.1 [4]. Este supone tener 8 canales independientes de sonido (tres canales de pantalla –L, C, R; dos canales de surround laterales – LS, RS; dos canales de surround traseros – BLS, BRS; y un canal de efectos de baja frecuencia- LFE). Esta disposición actual se puede observar en la figura 1.

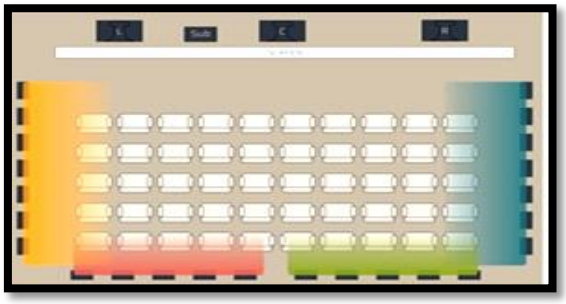


Figura 1. Sistema de sonido DOLBY DIGITAL 7.1

La aparición en estos últimos años de películas con imagen en 3D, ha impulsado la búsqueda de nuevos sistemas innovadores de sonido más realistas que vayan acorde con la imagen en 3D, pudiendo localizarlas de manera puntual e intentando que el espectador se sienta parte de la película y no sólo un oyente.

La llegada del actual DOLBY ATMOS, supone otro cambio en la percepción humana a la hora de ver cine. Este sistema (figura 2) está basado en el manejo individual de cada altavoz, dejando de lado así la terminología surround derecho, izquierdo o trasero, pudiendo así determinar sonidos más precisos en cuanto al posicionamiento, en otras palabras, pasaríamos de tener un sonido con formato 7.1 a un sonido con hasta 64.5; 64 canales independientes de sonido repartidos por los distintos altavoces de la sala y 5 canales para efectos distribuidos 3 en pantalla y otros dos en la parte posterior de la sala, uno en cada esquina. Otro cambio que introduce este sistema son las dos filas de altavoces situadas en el techo, intentando conseguir un sonido más real pudiéndolo ubicar sobre la cabeza de los oyentes. El sistema DOLBY ATMOS es completamente compatible con los sistemas actuales de sonido 5.1 y 7.1.

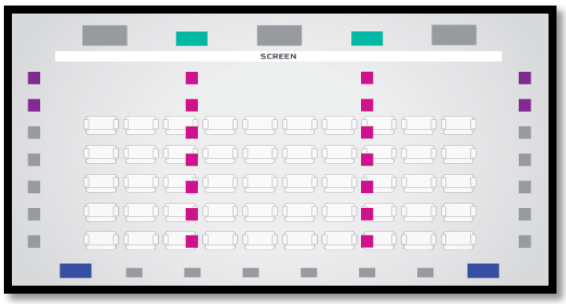



Figura 2. Sistema de sonido DOLBY ATMOS

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DOLBY ATMOS

El sistema DOLBY ATMOS tiene una colocación de los altavoces que no es única, sino que depende de las condiciones de cada sala en cuestión, tamaño, elevación y arquitectura. El

número de altavoces utilizados no se puede concretar ya que eso reduciría la calidad del sonido y el rendimiento del sistema, por lo que dependerá de las características de la sala. El sistema DOLBY ATMOS permite hasta 128 señales entre canales y objetos, obteniendo 64 salidas diferentes.

**Altavoces de Pantalla**

Los altavoces de pantalla estarán colocados detrás de la misma, situando el centro acústico de los altavoces (normalmente el altavoz de agudos) a 2/3 de la altura de la pantalla. Respecto al número de altavoces, tendremos el altavoz central C, y los laterales izquierdo L y derecho R lo más cerca posible de los bordes laterales de la pantalla. Para pantallas de más de 12 metros de largo se suelen añadir dos altavoces adicionales (figura 3) entre los laterales y el central, LC y RC. En cuanto al apuntamiento y orientación, será hacia 2/3 de la longitud de la sala y justo en el centro (figura 4).

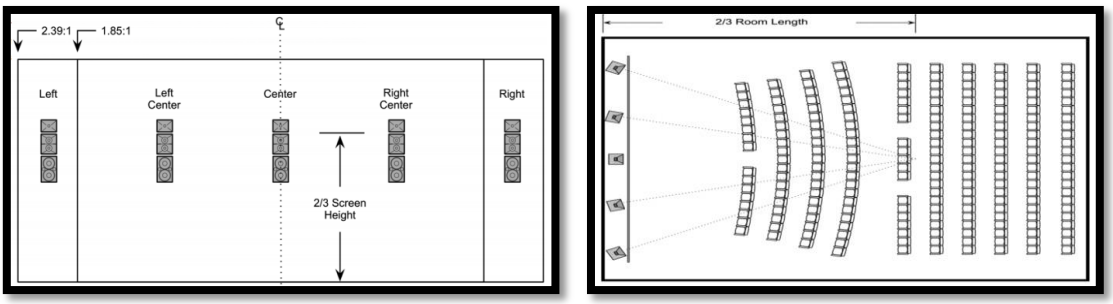



Figura 3 y Figura 4. Colocación y Apuntamiento de los altavoces de pantalla.

**Altavoces Surround Laterales**

En este sistema, los altavoces laterales y traseros funcionan de manera independiente, por lo que no se les puede tratar como canales de surround en su conjunto, lo que conlleva que su configuración y posicionamiento sea distinto respecto de los sistemas anteriores. Los altavoces suelen situarse a una distancia de 2-3 metros entre ellos pero es más eficiente colocarlos en función del ángulo con el oyente para cubrir las diferentes zonas de escucha, siendo siempre el ángulo entre ellos, $\alpha \leq 30º$, y el horizontal $\beta \leq 45º$ (figuras 5-7).

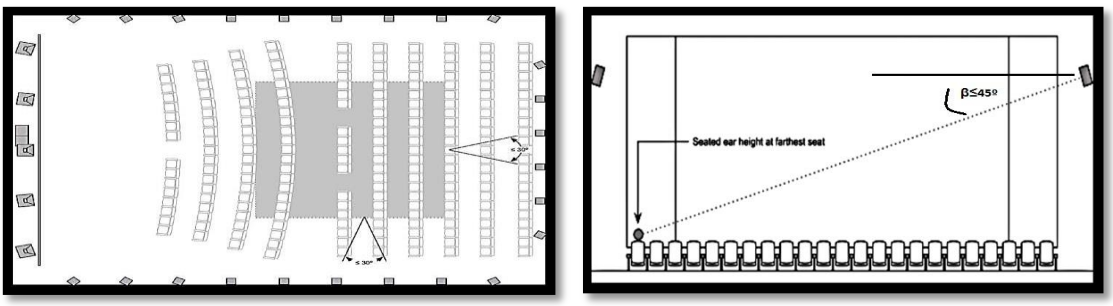



Figura 5 y Figura 6. . Ángulos de apuntamiento horizontal y vertical de los altavoces laterales.

**Altavoces Surround de Techo**

Estos altavoces son una de las novedades que incluye DOLBY ATMOS. Son dos “arrays” de altavoces situados en el techo en la línea de LC y RC y a la misma distancia entre ellos que los altavoces laterales apuntando horizontalmente al centro y verticalmente cubriendo las zonas de escucha. En este caso, el ángulo horizontal deberá estar en $10º‹\beta‹20º$ y el longitudinal $\alpha \leq 45º$ al igual que los altavoces de pared (figuras 8-9).

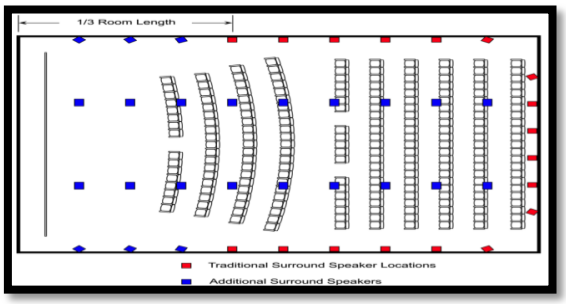



Figura 7. Colocación de los altavoces laterales y techo

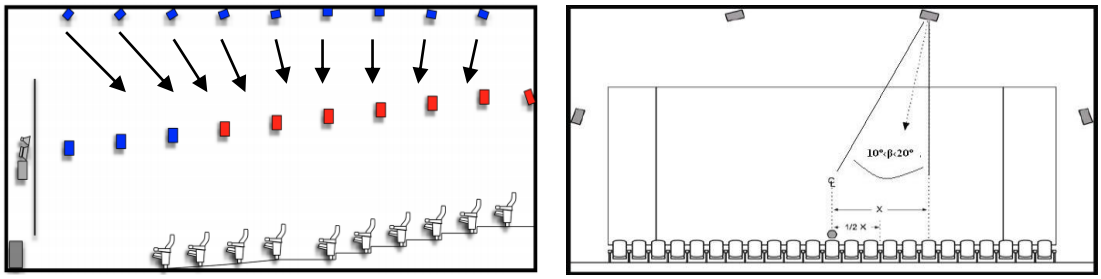



Figura 8 y Figura 9. Orientación y apuntamiento de los altavoces de techo

**Altavoces de Subgraves**

Al igual que en configuraciones anteriores, los altavoces LFE (*Low Frecuency Effects*) se situará en el suelo justo en el centro de la pantalla y de manera asimétrica para evitar posibles modos y aumentando su eficiencia (Figura10).

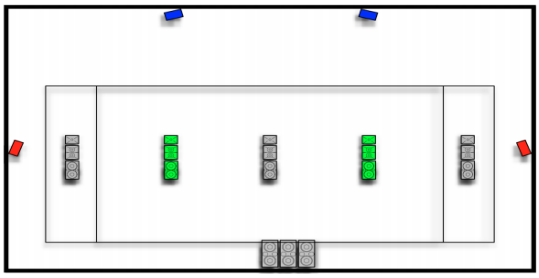


Figura 1. Colocación general incluido LFE

Opcionalmente se puede reforzar con dos altavoces LFE situados a ambos lados de la pared trasera a una distancia mínima de 1 metro de la pared lateral. Actualmente lo que se hace es la utilización de la técnica "*bass management*", que consiste en enviar la señal de baja frecuencia de los altavoces laterales y de techo a estos altavoces para poder utilizar mayor potencia en el resto de bandas.

**Ecualización**

En este sistema, el proceso de ecualización difiere con respecto a sistemas anteriores. En este caso se realiza una ecualización individual para cada altavoz de acuerdo con la Curva X-ISO 2696 [5] (Figura 11) teniendo en cuenta una serie de puntos u oyentes situados de manera no simétrica en la zona de escucha.

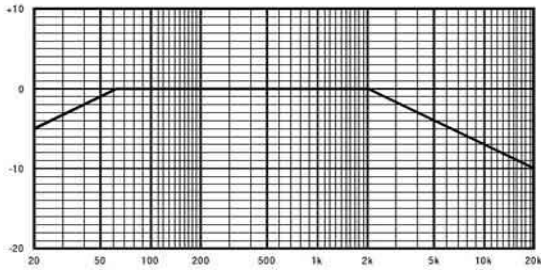



Figura 11. Curva X para la ecualización de la sala

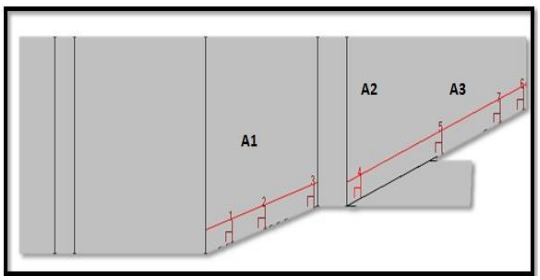
## MODELO GEOMÉTRICO DE LA SALA 6 DE KINÉPOLIS CIUDAD DE LA IMAGEN

Esta sala alberga una capacidad para 750 butacas, por lo que se la puede considerar una sala bastante grande. Sus dimensiones son las siguientes:

| Medida | Valor |
|---|---|
| Volumen | 10017.59 $m^3$ |
| Superficie total | 4085.49 $m^2$ |
| Superficie efectiva | 4069.10 $m^2$ |
| Largo | 43.50 m |
| Ancho | 26 m |
| Altura máxima | 10.95 m |
| Altura mínima | 3.60 m |
| Ancho de pantalla | 24 m |
| Altura de pantalla | 10 m |

Tabla 1. Dimensiones de la sala

La sala cuenta con una galería detrás de la pantalla desde la cual poder realizar cambios, ajustes o arreglos de los altavoces de pantalla sin problema, además de ayudar al aislamiento del sonido. También cuenta con un espacio vacío de butacas delante de la pantalla bastante amplio de 11.3 metros de largo. A continuación de este espacio se encuentran las tres diferentes zonas de audiencia que tenemos en la sala (Figura 12 y Figura 13). La más cercana a la pantalla es la A1, la más alejada la A2 y la intermedia es la A3 [6].



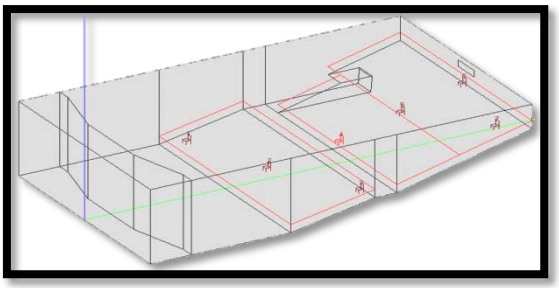



Figura 12 y Figura 13. Vistas de la sala 6 de Kinépolis

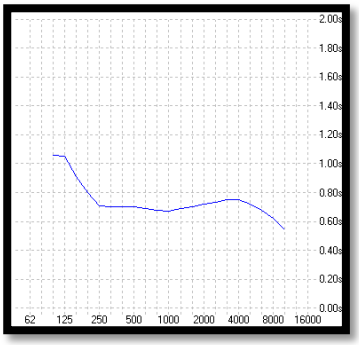
### Materiales Acústicos y Tiempo de Reverberación

En las paredes delantera y trasera se colocará material absorbente para evitar posibles ecos molestos al igual que en el techo. La pared donde estén colocados los altavoces de pantalla deberá ser tener un alto nivel de absorción para evitar ondas estacionarias.

Panel Din: Este material se utilizará para las paredes laterales de la sala.

Manta 322-G: Utilizado en la pared trasera de la sala y en la pared donde se encuentran los altavoces de pantalla.
Moqueta con fieltro: Utilizada para el suelo.
Butaca tapizada con terciopelo: Utilizada para simular las zonas de audiencia.
Techo FM-12: Utilizado para el techo de la sala.
Cristal: Utilizado en la ventana de la cabina de proyección
Puerta de madera maciza: Utilizado en las puertas de acceso y emergencia.
Absorción de 30%: Utilizado para los laterales de la pantalla.

Una vez aplicados todos los materiales anteriormente citados, el tiempo de reverberación de la sala aparece en la figura 14.




| Frecuencia (Hz) | T (s) | Frecuencia (Hz) | T (s) |
|---|---|---|---|
| 100 | 1,06 | 1250 | 0,69 |
| 125 | 1,05 | 1600 | 0,70 |
| 160 | 0,91 | 2000 | 0,72 |
| 200 | 0,80 | 2500 | 0,73 |
| 250 | 0,71 | 3150 | 0,75 |
| 315 | 0,70 | 4000 | 0,75 |
| 400 | 0,70 | 5000 | 0,72 |
| 500 | 0,70 | 6300 | 0,68 |
| 630 | 0,69 | 8000 | 0,62 |
| 800 | 0,68 | 10000 | 0,54 |
| 1000 | 0,67 | | |

Figura 14. Tiempo de reverberación de la sala en función de la frecuencia

## DISEÑO DEL SISTEMA DE REFUERZO SONORO

Siguiendo con las indicaciones de DOLBY ATMOS, el sistema diseñado para la sala 6 consta de **5 altavoces de pantalla triamplificados** (15 señales); **9 altavoces de surround todo rango** en cada pared lateral, **9 altavoces de surround todo rango** en cada "array" del techo y **6 altavoces de surround todo rango** en la pared trasera (un total de 42 señales de surround); **3 altavoces de LFE** en el centro de la pantalla de forma asimétrica y **2 altavoces de subgraves** en la pared como refuerzo para el sistema de surround (5 señales de subgraves). En total se ha diseñado un sistema de **62 señales distintas**. Este sistema estará controlado por un procesador DOLBY CP850, que puede trabajar con hasta 64 señales diferentes y el sistema de amplificación correspondiente. La disposición y apuntamiento del sistema de refuerzo sonoro se puede apreciar en las figuras 15 y 16 [7].

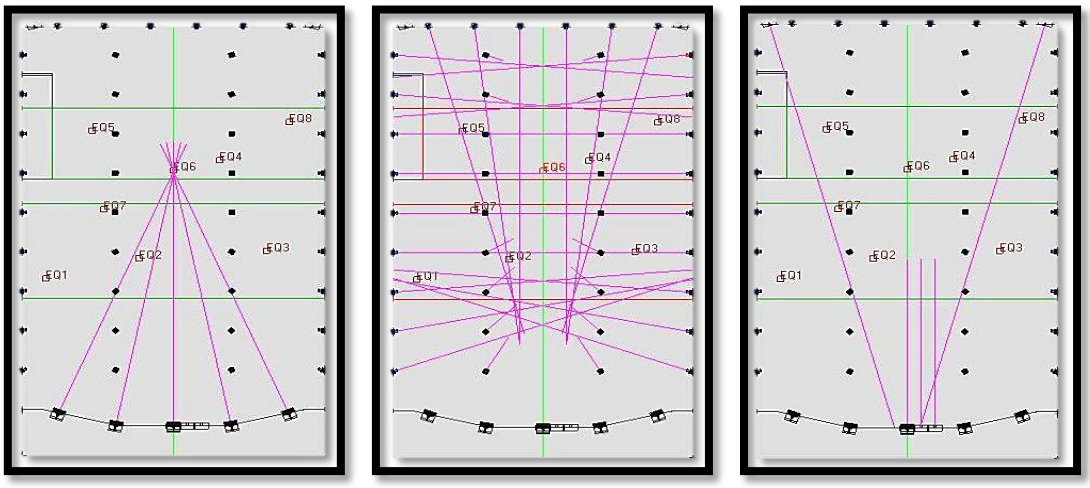



Figura 15. Colocación y apuntamiento de los altavoces. Vista en planta.

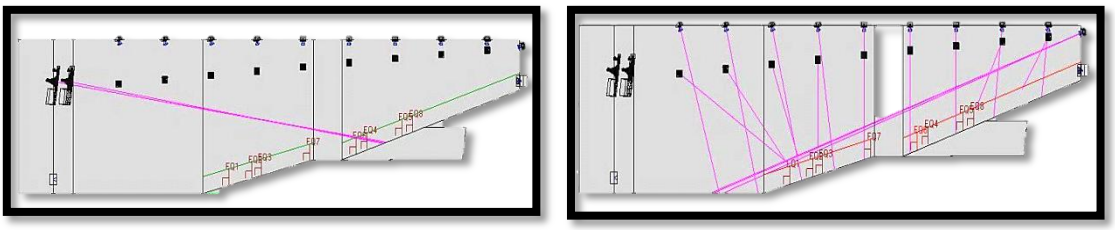


Figura 16. Colocación y apuntamiento de los altavoces. Vista en alzado lateral.

El sigueinte paso consiste en la ecualización independiente de cada uno de los altavoces de acuerdo a lo especificado por la curva ISO 2696. El proceso de ecualización se realiza con los altavoces trabajando a potencia máxima y se varía la potencia de los altavoces en bandas de tercio de octava hasta conseguir la curva ISO 2696. El siguiente paso es el ajuste de niveles de cada altavoz por separado. Los requerimientos de DOLBY ATMOS especifican que debemos conseguir unos niveles en banda ancha de 85 dBC para los altavoces de pantalla y surround (de forma individual) y 95 dBC para los altavoces de subgraves. Estos niveles se deberán garantizar en un entorno del punto de ecualización de la sala (EQ6 en las figuras). Se parte de la gráfica de ecualización de cada altavoz a potencia máxima y se varía la potencia en banda ancha hasta conseguir los valores especificados anteriormente (figura 17). Los mapas de recubrimiento de campo total ($SPL_T$) se muestran en la figura 18.

Una vez realizados los pasos de ecualización y ajuste de nivel de cada uno de las 62 fuentes, se ha procedido a realizar un estudio utilizando el algoritmo AURA de EASE, con el fin de poder calcular la respuesta impulsiva de cada fuente en las posiciones de los 8 oyentes que se han colocado en el modelo geométrico. Con estas respuestas impulsivas se han calculado los reflectogramas en cada oyente con el fin de estimar la curva de decrecimiento de energía, el tiempo de reverberación por el método de Schoerder, la respuesta en frecuencia y el resto de parámetros acústicos de la sala con el sistema DOLBY ATMOS funcionando. El conjunto de las 62x8 respuestas impulsivas han servido para calcular la respuesta biaural y poder realizar la auralización de los 62 eventos sonoros en las posiciones de los oyentes. También se ha estudiado el funcionamiento del sistema al completo, con el fin de tener una idea de sistema conjunto, aunque no será una situación que ocurra en la realidad (Figura 19).

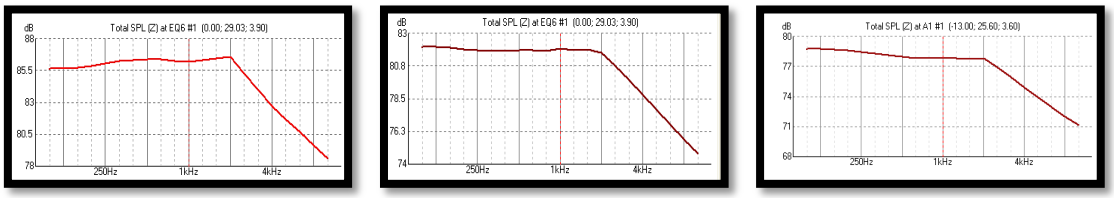


Figura 17. Ajuste de niveles: C de pantalla; P1 surround lateral; T10 surround de techo

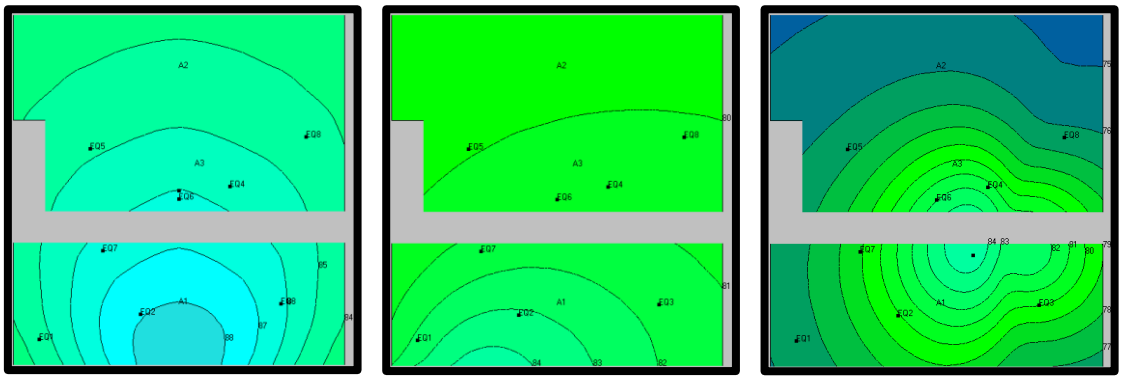


Figura 18. *Mapping* $SPL_T$: C de pantalla; P1 surround lateral; T10 surround de techo

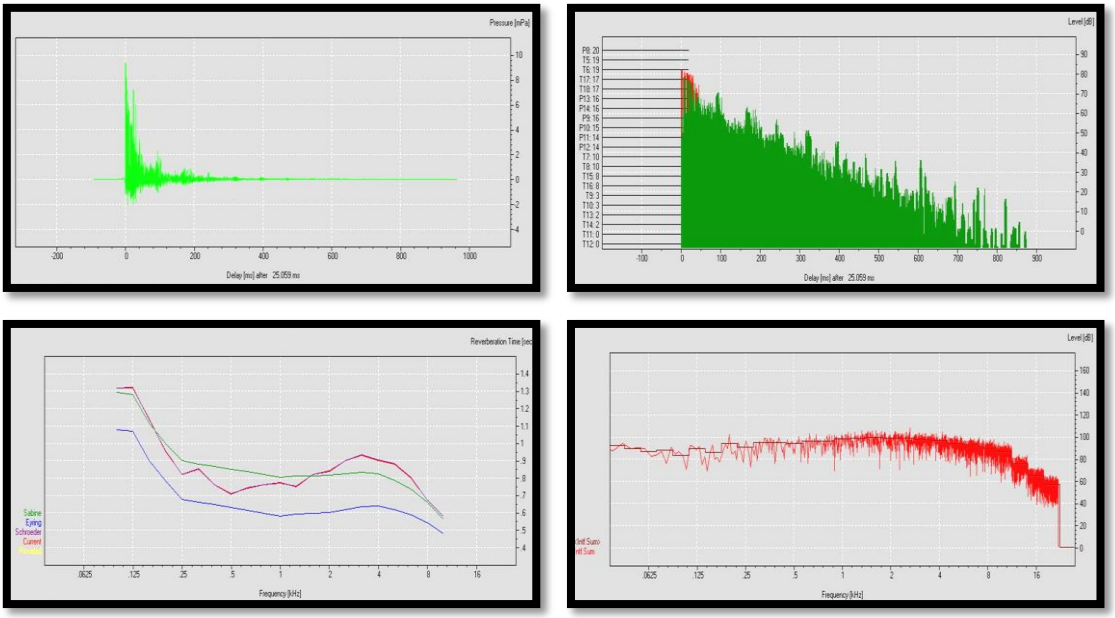


Figura 19. Respuesta impulsiva, reflectograma, RT Schroeder y respuesta en frecuencia del sistema completo en el punto de escucha EQ6.

## CONCLUSIONES

El diseño de esta sala de cine ha servido como base de partida para la remodelación de la sala 6 de Kinépolis para reconvertirla en una sala DOLBY ATMOS. A finales de 2014 se estrenó la sala y la disposición de los altavoces siguió lo dispuesto en el trabajo que aquí se presenta.

Las salas DOLBY ATMOS están teniendo una gran difusión entre salas de multicine y suponen una clara mejora de la percepción sonora de los eventos de audio. Como se comentó anteriormente la proyección de películas en 3D junto con los sistemas de sonido inmersivo están suponiendo una revolución en la forma de disfrutar del cine en los tiempos actuales.

La utilización de herramientas de simulación permitirá realizar una aproximación bastante fiel a la realidad de la puesta en marcha de salas de cine con sonido DOLBY ATMOS, permitiendo emplear menor cantidad de tiempo a la hora de instalación de este tipo de sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Digital Cinema Initiatives, LLC, Member Representatives Committee, 2012, Digital Cinema System Specification, 2012.
[2] SMPTE TC-25CSS, Report of the Study Group on Immersive Audio Systems: Cinema B-Chain and Distribution, 2014.
[3] DOLBY LABS, Dolby® Surround 7.1, Technical Information for Theaters; 2010.
[4] DOLBY LABS, Dolby® ATMOS, Cinema Technical Guidelines, 2012.
[5] International Standard Organization, ISO-2969 X curve, 2002.
[6] Gómez Alonso, R., Proyecto Fin de Carrera “Estudio Acústico y Electroacústico de las Salas 6 y 7 de Kinépolis (Madrid)”, EUITT, 2008.
[7] García González, S., Proyecto Fin de Carrera, “Diseño de la Sala 6 de Kinépolis –Madrid con un Sistema Dolby Atmos”, 2012.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# 3D-MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN ACÚSTICA DE RECINTOS ESPAÑOLES DE GRAN CAPACIDAD. EVALUACIÓN DEL TR

**PACs.: 43.55.Gx. 43.55.Ka**

San Martín, Ricardo; Machín, Jorge; Arana, Miguel
Institución: Universidad Pública de Navarra. Laboratorio de Acústica. Dpto. de Física.
Dirección: Campus de Arrosadia, s/n. 31008.
Población: Pamplona. Navarra.
País: España
Tel: 948 169568
Fax: 948 169565
E-Mail: marana@unavarra.es

## ABSTRACT

In this paper, the first results of auralizARTE Project, developed by the Acoustic Group at the Public University of Navarra, which consists of the 3D digitalization and later acoustic simulation of Spanish theaters and auditoriums are presented. The project aims to "X-ray" (based on simulated estimates and technical characteristics of each room) the current state of the national network of performance venues, providing a database with its sound quality can be assessed by auralizations. In this first phase, the findings regarding reverberation obtained in 63 rooms with more than 1000 seats are analyzed.

## RESUMEN

En esta comunicación se presentan los primeros resultados del proyecto auralizARTE, desarrollado por el grupo de Acústica de la Universidad Pública de Navarra, que consiste en la digitalización 3D y posterior simulación acústica de teatros y auditorios españoles. El proyecto pretende “radiografiar”, en base a estimaciones simuladas y a características técnicas de cada recinto, el estado actual de la red de recintos escénicos nacionales, proporcionando una base de datos con la que pueda evaluarse su calidad acústica mediante auralizaciones. En esta primera fase, se analizan los resultados obtenidos en un total de 63 recintos con aforo superior a 1000 espectadores, relativos a la evaluación de la reverberación.

## INTRODUCCIÓN

Es de sobra conocido el profundo estudio realizado a lo largo de muchos años por Leo L. Beranek sobre la recopilación de las características acústicas de un gran número de recintos escénicos (salas de concierto y de ópera) distribuidos por todo el mundo. Se recopilan en su muy conocido libro “Concert and Opera Halls: How They Sound” [1]. Establece una clasificación desde Categoría A+ (Superior) hasta Categoría C (Aceptable) en función de la evaluación subjetiva de expertos musicales y público. En base a las características geométricas y acústicas de tales recintos se pueden encontrar relaciones entre algunos parámetros acústicos y la categorización

de los recintos, con el siempre difícil objetivo de correlacionar magnitudes acústicas objetivas y cualificaciones acústicas subjetivas.

A nivel español, la fundación SGAE (Sociedad General de Autores y Editores) tiene abierta una página web (MIRE: Mapa Informatizado de Recintos Escénicos [2]) donde se aporta información, bastante completa, sobre múltiples recintos escénicos españoles. Actualmente (15/08/2015) tal página incluye un total de 134 recintos escénicos con aforo superior a 1.000 asientos. En un estudio previo [3] se llevó a cabo un estudio comparativo entre diferentes características geométricas y acústicas de 16 de tales recintos con los de la base de datos del citado trabajo de Beranek. Por otra parte, en otro PFC [4] se modelizaron con el programa Odeon [5] 63 recintos, escogidos por ser los que en dicho momento constaban en la página MIRE como recintos escénicos con capacidad superior a 1.000 asientos. Sobre estos 63 recintos hemos llevado a cabo diversos análisis acústicos previos a su auralización. Se presentan en esta comunicación resultados preliminares, especialmente sobre las diferentes estrategias de evaluación que sobre la reverberación del local realiza el programa Odeon. Las características geométricas básicas de estos recintos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Recintos escénicos analizados (AC: año de construcción: AUC: año de última reforma; L-A-H: longitud, anchura y altura máximas)

| Nº | Recinto | AC | AUR | Aforo | V, m$^3$ | L, m | A, m | H, m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Teatro Principal. Zaragoza | 1799 | 1987 | 1104 | 6942 | 34,7 | 18,0 | 19,7 |
| 2 | Palau de la Música. Valencia | 1832 | 1991 | 1226 | 15400 | 21,8 | 16,0 | 15,9 |
| 3 | Gran Teatre del Liceu. Barcelona | 1847 | 1999 | 2321 | 10916 | 37,2 | 24,0 | 18,8 |
| 4 | Teatro Real. Madrid | 1850 | 1997 | 1742 | 13843 | 45,1 | 30,3 | 26,4 |
| 5 | Teatro de la Zarzuela. Madrid | 1856 | 1998 | 1242 | 5739 | 32,7 | 21,2 | 14,2 |
| 6 | Teatro Romea. Murcia | 1862 | 1988 | 1204 | 4688 | 32,6 | 17,6 | 14,5 |
| 7 | Teatro Calderón de la Barca. Valladolid | 1864 | 1999 | 1115 | 8123 | 33,9 | 23,0 | 17,2 |
| 8 | Teatro Miguel de Cervantes. Málaga | 1870 | 1987 | 1058 | 7801 | 41,4 | 21,2 | 20,3 |
| 9 | Teatro Arriaga. Bilbao | 1890 | 1986 | 1502 | 6646 | 32,2 | 24,6 | 12,8 |
| 10 | Teatro Campoamor. Oviedo | 1892 | 1998 | 1440 | 8949 | 37,5 | 24,1 | 20,6 |
| 11 | Teatro Jovellanos. Gijón | 1899 | 1995 | 1202 | 7231 | 36,0 | 19,4 | 19,5 |
| 12 | Teatro Apolo. Barcelona | 1904 | 1993 | 1016 | 4034 | 28,5 | 24,0 | 9,9 |
| 13 | Palau de la Música Catalana. Barcelona | 1908 | 2004 | 2138 | 11018 | 53,3 | 24,1 | 17,6 |
| 14 | Teatro Circo. Orihuela | 1908 | 1996 | 1200 | 9206 | 39,3 | 35,8 | 18,1 |
| 15 | Gran Teatro Falla. Cádiz | 1910 | 1990 | 1214 | 9990 | 38,6 | 28,3 | 16,1 |
| 16 | Teatro Olympia. Valencia | 1915 | 1997 | 1055 | 6885 | 47,2 | 24,3 | 11,2 |
| 17 | Teatre Victória. Barcelona | 1916 | 1992 | 1224 | 5588 | 35,4 | 22,3 | 13,1 |
| 18 | Teatre Municipal El Jardí. Figueres | 1917 | 1991 | 1057 | 7738 | 43,1 | 19,5 | 13,4 |
| 19 | Teatro Principal Antzokia. Vitoria | 1918 | 1992 | 1042 | 5927 | 26,2 | 19,0 | 16,0 |
| 20 | Teatre Tívoli. Barcelona | 1919 | | 1640 | 7655 | 44,8 | 23,3 | 16,6 |
| 21 | Teatro Lope de Vega. Madrid | 1924 | 1997 | 1434 | 10501 | 38,0 | 26,6 | 18,1 |
| 22 | Teatro Olimpia. Huesca | 1925 | 2008 | 1159 | 4025 | 27,7 | 18,2 | 11,9 |
| 23 | Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera | 1928 | 1996 | 1200 | 7522 | 29,0 | 22,8 | 14,6 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | Teatro Coliseum. Madrid | 1932 | 2001 | 1451 | 12705 | 37,7 | 29,3 | 25,0 |
| 25 | Teatro Nuevo Apolo. Madrid | 1932 | 1988 | 1275 | 8472 | 45,3 | 16,5 | 24,9 |
| 26 | Teatro Gayarre. Pamplona | 1932 | 1999 | 1063 | 4888 | 25,9 | 21,7 | 15,4 |
| 27 | Sala Capitol. Madrid | 1933 | 1994 | 1373 | 10203 | 32,9 | 30,9 | 18,7 |
| 28 | Teatro Gran Vía. Madrid | 1944 | | 1020 | 4652 | 29,7 | 18,4 | 11,7 |
| 29 | Cine-Teatro Filarmónica. Oviedo | 1944 | 2004 | 1221 | 6663 | 29,5 | 23,0 | 17,4 |
| 30 | Teatro Principal. Requena | 1945 | 1995 | 1432 | 6826 | 44,4 | 22,5 | 10,8 |
| 31 | Teatro Avenida. SD de la Calzada | 1951 | | 1103 | 3037 | 28,4 | 22,8 | 9,3 |
| 32 | Sala Teobaldo Power. La Orotava | 1953 | 1990 | 1002 | 5013 | 34,6 | 21,2 | 14,2 |
| 33 | Teatro Cine Montecarlo. Buñol | 1953 | 1988 | 1032 | 5692 | 41,7 | 17,3 | 11,1 |
| 34 | Teatre Municipal La Faràndula. Sabadell | 1955 | 2001 | 1069 | 8462 | 43,0 | 26,5 | 17,0 |
| 35 | Teatro del IES Universidad Laboral. Gijón | 1956 | | 1331 | 7801 | 32,6 | 31,1 | 18,1 |
| 36 | Teatro del Parque de Atracciones. Madrid | 1969 | 1999 | 2533 | 13811 | 46,0 | 82,4 | 11,6 |
| 37 | Sala Magna. Auditorio. Palma de Mallorca | 1969 | | 1739 | 10750 | 42,2 | 25,1 | 21,2 |
| 38 | Auditorio. Palacio de Congresos. Madrid | 1970 | | 1909 | 14623 | 44,6 | 54,6 | 16,8 |
| 39 | Auditorio Manuel de Falla. Granada | 1978 | 1987 | 1313 | 11730 | 52,5 | 27,0 | 19,3 |
| 40 | Teatre La Passió - Olesa de Montserrat | 1987 | | 1499 | 13293 | 42,3 | 56,6 | 13,3 |
| 41 | Auditorio Nacional de Música. Madrid | 1988 | | 2324 | 29279 | 39,0 | 28,0 | 18,8 |
| 42 | Sala Ángel Brage. Santiago de Compostela | 1989 | | 1030 | 8940 | 42,1 | 26,4 | 12,0 |
| 43 | Sala Argenta. Santander | 1991 | | 1642 | 31003 | 61,8 | 41,7 | 29,9 |
| 44 | Sala García Lorca. Granada | 1992 | | 1999 | 11218 | 38,9 | 54,4 | 11,6 |
| 45 | Sala Mozart. Zaragoza | 1994 | | 1992 | 23311 | 59,2 | 46,2 | 20,4 |
| 46 | Sala Narciso Yepes. Murcia | 1995 | | 1838 | 12574 | 42,7 | 52,3 | 18,2 |
| 47 | Sala Santiago. Santiago de Compostela | 1995 | | 1580 | 22424 | 72,6 | 36,7 | 13,2 |
| 48 | Auditorio Municipal. Puertollano | 1995 | | 1118 | 9232 | 38,8 | 19,9 | 19,6 |
| 49 | Sala Alfredo Kraus. Las Palmas de GC | 1997 | | 1646 | 17322 | 55,4 | 35,3 | 19,1 |
| 50 | Auditorio I, Pal. de Cong. Valencia | 1998 | | 1481 | 10051 | 37,3 | 33,4 | 14,0 |
| 51 | Sala Sinfónica - L'Auditori - Barcelona | 1999 | | 2203 | 20538 | 55,8 | 32,9 | 20,5 |
| 52 | Auditorio Euskalduna. Bilbao | 1999 | | 2165 | 26333 | 57,9 | 34,0 | 25,3 |
| 53 | Auditorio Príncipe Felipe. Oviedo | 1999 | | 1504 | 15345 | 47,8 | 28,8 | 19,6 |
| 54 | Auditorio Kursaal. San Sebastián | 1999 | | 1806 | 14148 | 51,0 | 27,8 | 18,4 |
| 55 | Teatro Auditorio. San Lorenzo del Escorial | 2000 | | 1065 | 6841 | 36,3 | 27,2 | 16,1 |
| 56 | Auditorio de la Univ. Carlos III. Leganés | 2001 | | 1050 | 11653 | 44,2 | 31,9 | 21,0 |
| 57 | Centro de las AE y de la música.Salamanca | 2002 | | 1434 | 11394 | 43,0 | 26,4 | 15,8 |
| 58 | Sala Principal, Auditorio. León | 2002 | | 1150 | 11901 | 55,3 | 25,1 | 14,6 |
| 59 | Sala Buero Vallejo. Guadalajara | 2002 | | 1003 | 9377 | 43,8 | 28,0 | 13,3 |
| 60 | Baluarte. Pamplona | 2003 | | 1568 | 15887 | 53,1 | 29,8 | 19,1 |
| 61 | Teatro Auditorio. Roquetas de Mar | 2004 | | 1305 | 10607 | 41,5 | 36,3 | 16,4 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 62 | Auditorio Pilar Bardem. Rivas Vaciamadrid | 2005 | | 1008 | 7377 | 27,8 | 51,0 | 15,5 |
| 63 | Pal. de Cong. Expo Aragón. Zaragoza | 2008 | | 1443 | 10283 | 49,7 | 31,6 | 12,5 |

**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE VOLÚMENES Y AFOROS.**

A lo largo de los años se ha producido una evolución musical, tanto sinfónica como operística. Tal evolución ha estado íntimamente influida por los recintos disponibles para su representación, influyendo cada una de ellas en la otra. Hemos querido representar la evolución histórica de los recintos escénicos, tanto en los internacionales como en los españoles, con el objetivo de observar (si se produce) alguna tendencia. La figura 1 muestra la evolución temporal tanto de los aforos como de los volúmenes de los recintos españoles. La figura 2 muestra la evolución temporal tanto de los aforos como de los volúmenes de los recintos internacionales analizados en la referencia [1]. En estas gráficas, no se ha escalado el eje "y" para no distorsionar las mismas.

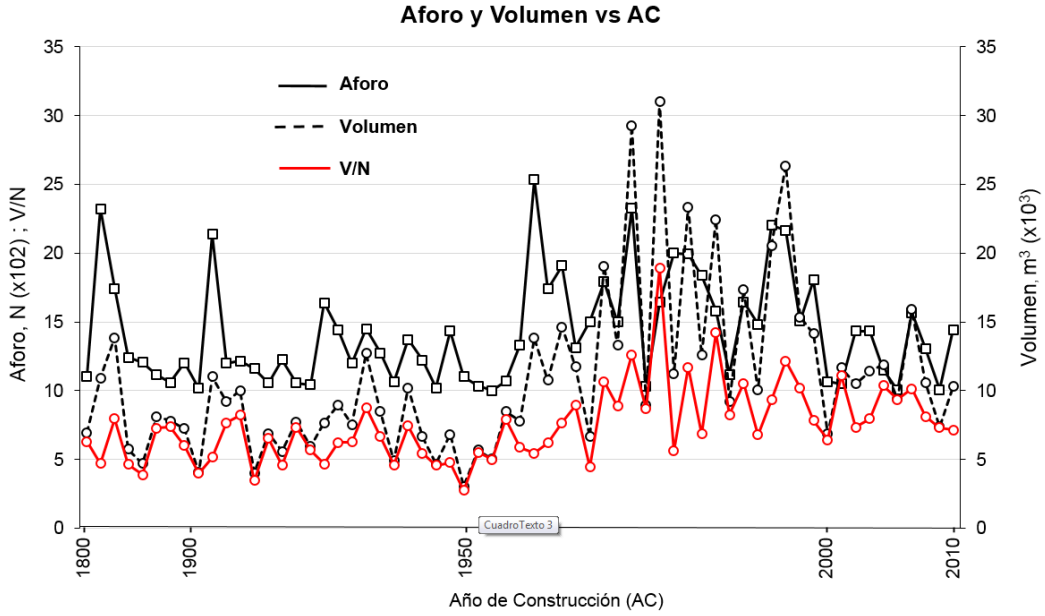



Fig. 1. Aforo, Volumen y V/N ($m^3$/per) versus año de construcción en recintos españoles

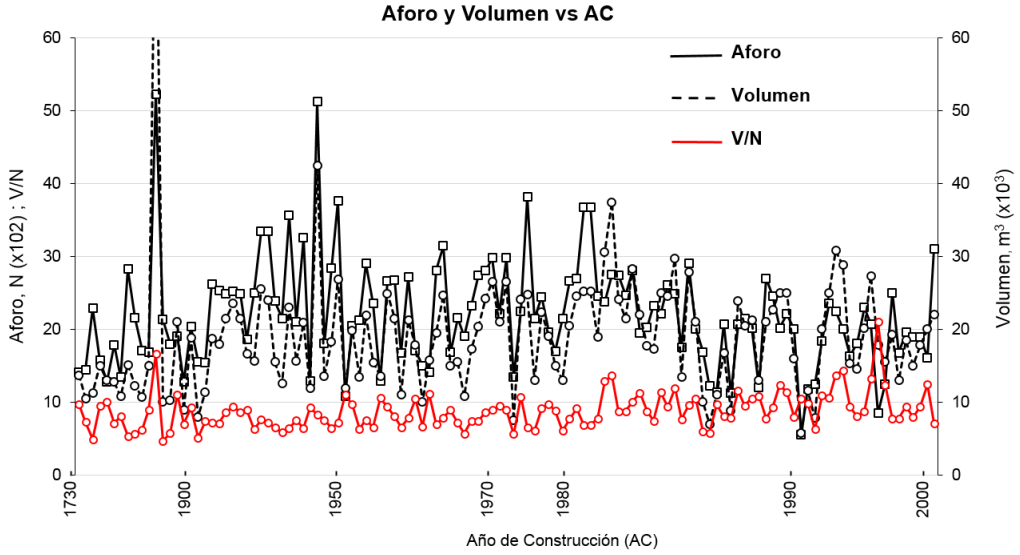



Fig. 2. Aforo, Volumen y V/N ($m^3$/per) versus año de construcción en recintos internacionales

El volumen promedio de los recintos españoles analizados es de 10.884 $m^3$ con desviación estándar de 5.951 $m^3$. Los correspondientes valores para los recintos internacionales analizados son, respectivamente, 19.041 $m^3$ y 8.902 $m^3$. Una primera conclusión es que los volúmenes de los recintos escénicos internacionales (su valor promedio) analizados casi duplica al valor de los recintos escénicos españoles. Por otra parte, respecto a los aforos, el valor promedio de los recintos españoles es de 1.426, siendo de 2.205 para los internacionales. El volumen por persona promedio para los recintos españoles es de 7,43 $m^3$/persona. El correspondiente a los recintos internacionales es de 8,72 $m^3$/persona.

## ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES $T_R$ EVALUADOS POR ODEON

Odeon presenta dos métodos de cálculo de la caída energética en una sala (EDC, Energy-time Decay Curve):

1. Quick Estimate (disponible desde el menú Material List).

Este es el método más rápido. Permite una rápida evaluación del efecto que produce el cambio de materiales y debiera ser usado únicamente como una herramienta para resultados preliminares.

2. Global Estimate. Ofrece resultados más preciso que el anterior.

### Quick Estimate.

Este método estima un coeficiente de absorción medio, el cual se introduce en las fórmulas de cálculo (Sabine, Eyring o Arau-Puchades) para dar una estimación del tiempo de reverberación. En vez de tomar, simplemente, las áreas de las diferentes superficies y multiplicarlas por los correspondientes coeficientes de absorción (para obtener la absorción total de la sala) Odeon lanza *partículas* (rayos) desde la fuente, asumiendo condiciones difusas (y, por tanto, reflejándolas en direcciones aleatorias) llevando una cuenta de cuántas veces chocan con cada superficie. Las superficies con mayor frecuencia de choques conllevan un mayor peso en el coeficiente de absorción medio global de la sala. Las superficies que no son detectadas en el proceso del trazado de rayos son excluidas en todos los cálculos y las superficies que son golpeadas por ambas caras se incluyen dos veces en los cálculos. El coeficiente de absorción medio viene dado por:

$$\overline{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i} \qquad [1]$$

Donde $S_i$ y $\alpha_i$ son, respectivamente, el área y coeficiente de absorción de la i-ésima superficie de la sala. El coeficiente de absorción media modificado tal como lo experimenta el trazado de rayos es:

$$\overline{\alpha}_i = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i} \qquad [2]$$

Donde $H_i$ es el número de choques con la i-ésima superficie de la sala. Odeon introduce ambos coeficientes de absorción en las fórmulas de Sabine y Eyring para calcular los tiempos de reverberación. El valor clásico (Ec. 1) se utiliza para obtener los tiempos de reverberación denominados como Tr de Sabine y de Eyring mientras que el modificado (Ec. 2) se utiliza para obtener los tiempos de reverberación denominados Tr de Sabine y Eyring *modificados*. Los cálculos de Tr requieren un valor para el volumen de la sala, valor que Odeon estima a partir del *recorrido libre medio* experimentado por el trazado de rayos, usando la conocida relación:

$$l = \frac{4V}{S} \qquad [3]$$

Donde $S$ es la superficie total activa de la sala. En las últimas versiones del programa, el proceso de trazado de rayos seguido para estimar el volumen de la sala asume coeficientes de scattering unidad para todas las superficies (no los coeficientes de scattering utilizados en la *lista*

*de materiales*) puesto que la fórmula del recorrido libre medio (Ec. 3) está basada en hipótesis de campo difuso. El valor de $S$ usado es la suma de las áreas de las superficies definidas como *no trasparentes*, teniendo en cuenta si una, otra o (por supuesto) ninguna de las caras de una superficie son visibles dentro de la sala.

**Criterio de Convergencia.**
Con respecto al *criterio de convergencia*, un cierto número de rayos deben emitirse y ser seguidos por la sala para obtener una estimación estable. Se continúa radiando rayos en direcciones aleatorias hasta que el valor del tiempo de reverberación se mantiene dentro del 1% para, al menos, 50 rayos. Al final de la ejecución, se almacena el dato de cuantas veces cada superficie ha sido golpeada por los rayos. Entonces, si se asignan nuevos materiales a las superficies, los tiempos de reverberación se pueden recalcular instantáneamente, sin necesidad de repetir el trazado de rayos.

**Global Estimate.**
Este método estima los tiempos de reverberación $T_{20}$ y $T_{30}$ usando el método de Schröeder [6] y el recorrido libre medio, generando estimaciones de la curva de caída. Los rayos se emiten desde la fuente en direcciones aleatorias y se reflejan utilizando el '*vector based scattering method*'. Odeon registra la pérdida de energía de cada rayo en función del tiempo, originada tanto por la absorción de las superficies de la sala como por el aire. Sumando sobre un gran número de rayos, se obtiene la función de decaimiento energético. Todo resulta análogo a la conocida curva de caída de Schröeder excepto que, en este caso, no se evalúa para un receptor específico. Este proceso de suma se puede llevar a cabo con tantos rayos como se desee.

**Evaluación de los resultados.**
Se derivan los resultados cuando las curvas de caída se alisan. Por lo general, los valores del $T_{30}$ son mayores que los del $T_{20}$. Si los resultados son los opuestos, es muy probable que el número de rayos usados fuera insuficiente y conviene recalcular (opción disponible en la parte inferior como *Recalculate*). Asímismo, si los valores aportados para el Tr son *.**, la longitud de la respuesta al impulso (*Impulse Response Length*) definida en la configuración de la sala (*Room Setup*) es demasiado corta para obtener los parámetros de la reverberación.

**Análisis de métodos en los recintos modelizados.**
En los recintos españoles modelizados que se han utilizado en este Proyecto, se han obtenido los resultados del tiempo de reverberación por diferentes vías. Nos centraremos en el parámetro $T_{30}$ (Sabine y Eyring) para el análisis que sigue.

En primer lugar, se han obtenido los $T_{30}$ tanto por el método Quick Estimate como por el método Global Estimate, es decir se dispone de los valores $T_{30}$ Sabine, $T_{30}$ Eyring, $T_{30}$ Sabine modificado y $T_{30}$ Eyring modificado, a los que denominaremos, respectivamente, $T_{30,S}$ , $T_{30,E}$ , $T_{30,Sm}$ y $T_{30,Em}$. Incluiremos, asimismo el tiempo de reverberación evaluado mediante el método Global Estimate, $T_{30GE}$.

Por otra parte, también se dispone del valor del $T_{30}$ en un receptor central de la sala, obtenido como respuesta al impulso en tal receptor. Lo denominaremos como $T_{30,Rcentral}$
Finalmente, se obtuvieron los $T_{30}$ en mallas de receptores ubicadas en la audiencia con la precisión (aproximada) de un receptor en cada asiento. A estos valores, promediados para todos los receptores de la malla, les denominaremos $T_{30,Mav}$ .

Previo a la comparación de los resultados para intentar contestar a la pregunta de cuál es la fiabilidad de los resultados ofrecidos por los diferentes métodos, uno debiera conocer cuál es el resultado *exacto*, es decir, el resultado *experimental* preciso. Obviamente, no se dispone de tales datos, amén de ser también discutible la precisión-incertidumbre de los resultados experimentales. Por tanto, el análisis se hará sobre los resultados obtenidos por el programa

(con diferentes métodos) y los diferentes criterios para evaluar el tiempo de reverberación de una sala.

Asumiremos como valor más representativo del tiempo de reverberación de una sala el promediado sobre toda la malla de receptores, es decir, $T_{30,Mav}$. Compararemos el resto de descriptores del tiempo de reverberación con este valor, para cada sala.

**Dispersión global**

Calculando la dispersión (desviación estándar de la variable $T_{30,i}$ respecto al *valor verdadero* $T_{30Mav}$) para los 63 recintos modelizados, obtenemos la siguiente gráfica (Fig. 3):

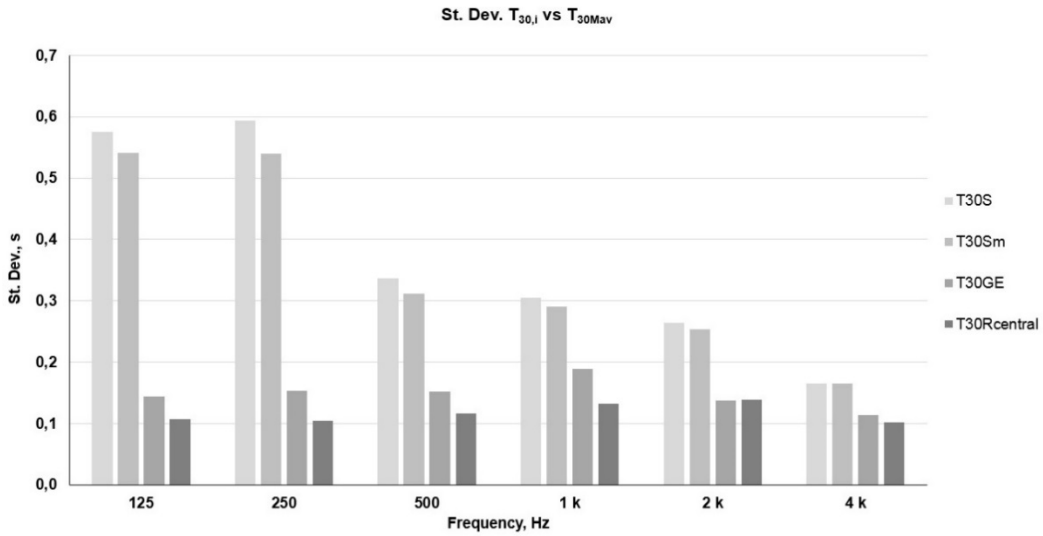



Fig. 3 Relación estimadores Quick Estimate, Global Estimate y Receptor Central

Como se observa claramente, los estimadores del Quick Estimate ($T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$) son peor estimadores que el Global Estimate ($T_{30GE}$) y el $T_{30Rcentral}$, especialmente en bajas frecuencias (125 y 250 Hz). Los otros dos estimadores afinan mucho mejor el tiempo de reverberación. Además, las desviaciones son muy elevadas. La siguiente tabla (Tabla 2) muestra, por frecuencias, los valores promedios de los $T_{30,Mav}$ de todas las salas, las desviaciones estándar de los descriptores y tales desviaciones expresadas en número de veces el jnd (*just noticeable difference*) del valor promedio, es decir, 5 % del valor.

Tabla 2 Valores promedios de los $T_{30,Mav}$, desviaciones estándar de los descriptores (en segundos) y desviaciones expresadas en número de veces el jnd del valor promedio

| Freq., Hz | 125 | 250 | 500 | 1 k | 2 k | 4 k |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{T}_{30Mav}$, s | 1,99 | 2,04 | 1,80 | 1,63 | 1,50 | 1,24 |
| St.Dev. $T_{30S}$, s | 0,57 | 0,59 | 0,34 | 0,30 | 0,26 | 0,17 |
| $jnd_S$ | 5,8 | 5,8 | 3,7 | 3,8 | 3,5 | 2,7 |
| St.Dev. $T_{30Sm}$, s | 0,54 | 0,54 | 0,31 | 0,29 | 0,25 | 0,16 |
| $jnd_S$ | 5,4 | 5,3 | 3,5 | 3,6 | 3,4 | 2,6 |
| St.Dev. $T_{30GE}$, s | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,19 | 0,14 | 0,11 |
| $jnd_S$ | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 2,3 | 1,8 | 1,8 |
| St.Dev. $T_{30Rcentral}$, s | 0,11 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,10 |
| $jnd_S$ | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 1,6 | 1,8 | 1,6 |

Nuestra conclusión sobre los resultados obtenidos es la siguiente. La mayor desviación de los estimadores $T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$ debe ser atribuida a que las hipótesis de campo difuso no se cumplen adecuadamente (suponiendo que el descriptor $T_{30,Mav}$ es el valor más preciso) . Por otra parte, el

propio procedimiento de estimación para el $T_{30GE}$ (tal como se explica en el manual) es, realmente, parecido al promedio llevado a cabo para el cálculo del $T_{30Mav}$.

**Valores individuales.**
Para concluir este apartado, presentaremos la gráfica (Figura 4) de las desviaciones para cada uno de los recintos, de cada estimador frente al $T_{30Mav}$ y para la banda de frecuencia de 1 kHz. Los recintos están ordenados por orden creciente de desviación del $T_{30Rcentral}$ y se expresan en % de desviación. Tal gráfica vuelve a corroborar los mejores ajuntes de los estimadores $T_{30GE}$ y $T_{30Rcentral}$, así como el similar comportamiento de los estimadores $T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$, mucho peor estimadores, a su vez, que los anteriores.

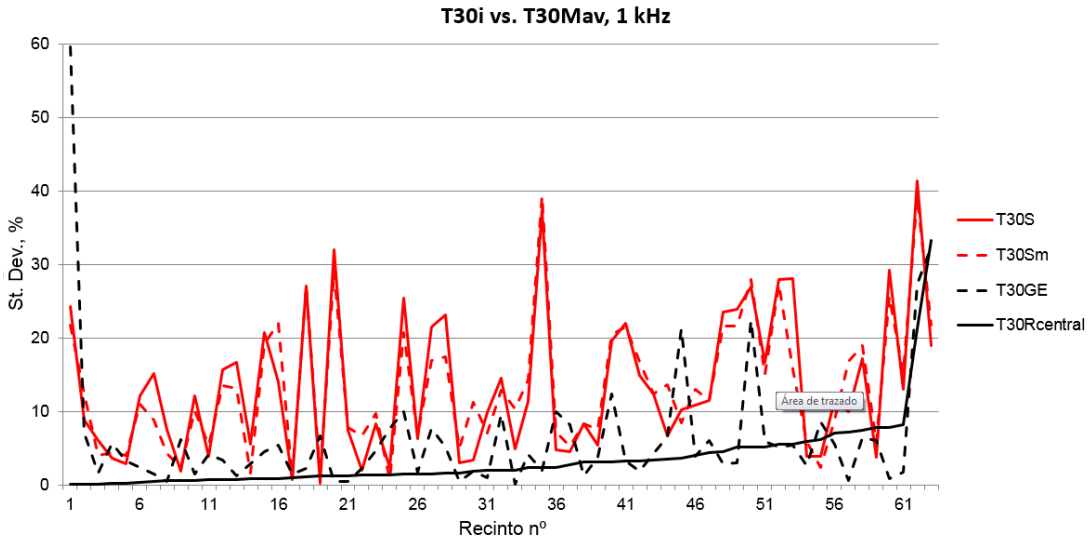



Fig. 4 Desviaciones de los estimadores, para cada sala, en la banda de 1 KHz

## CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la modelización de 63 recintos escénicos españoles con aforo superior a 1.000 personas con el programa Odeon, como paso previo a la auralización de los mismos. De los diferentes métodos que utiliza este programa para evaluar la reverberación del local (y asumiendo como valor más preciso el valor promedio de los puntos del mallado de receptores con precisión de un asiento) hemos observado que el valor obtenido del tiempo de reverberación para un punto central del mallado resulta el más preciso para valorar la reverberación del local. La estrategia utilizada por el método 'global estimate' (si bien menos precisa en sus resultados que el procedimiento anterior) mejora notablemente los resultados aportados por las estrategias del 'quick estimate' (básica y modificada)

## REFERENCIAS

[1] Leo L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: How They Sound*, Springer, N.Y. 2004
[2] http://www.mirem.net/web/mireinicio.php
[3] Laura Ruiz Domínguez, *Comparación de resultados obtenidos mediante procedimientos experimentales y computacionales en la caracterización acústica de recintos*, PFC, Laboratorio de Acústica, Dpto. de Física, UPNA. Abril, 2015
[4] Juan Cetina Panzano, *Teatros y auditorios de gran capacidad. Características técnicas y acústicas*, PFC, Laboratorio de Acústica, Dpto. de Física, UPNA. Febrero, 2015
[5] ODEON: *room acoustics program*. User manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2015
[6] Schroeder M.R., *New method of measuring reverberation time*, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 37(3), 409-412, 1965.

# ACÚSTICA VIRTUAL DE LA CAPILLA DEL PALACIO DE SAN TELMO DE SEVILLA

**PACS**: 43.55.Ka

E. Alberdi; M. Galindo; A.L. León
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, España, Tel: +34 954 556 595, Fax: +34 954 557 018, E-mails: ealberdi@us.es; mgalindo@us.es; leonr@us.es

## ABSTRACT

The chapel of San Telmo's Palace is a clear example of Spanish baroque architecture, specifically from the Seville Baroque architecture, designed by the master Leonardo de Figueroa (1670-1730), whose main works are developed in the city of Seville. In this paper the results of the simulation of the sound field are presented in this enclosure. Nowadays the chapel is deconsecrated and is the venue for concert series and representative and cultural events. The virtual acoustics allows us to evaluate different sound sources, their locations and the occupancy rate.

## RESUMEN

La capilla del Palacio de San Telmo es un ejemplo claro de la arquitectura barroca española, más concretamente de la arquitectura barroca sevillana, obra del maestro Leonardo de Figueroa (1670-1730), cuyas obras principales se desarrollan en la ciudad de Sevilla. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del campo sonoro de este recinto. Dado que actualmente la capilla se encuentra desacralizada, el uso de la misma acoge ciclos de conciertos y actos representativos y de contenido cultural. La acústica virtual nos permite evaluar diferentes fuentes sonoras, sus localizaciones y el grado de ocupación.

## LA CAPILLA DEL PALACIO DE SAN TELMO

En general puede decirse que las iglesias barrocas suponen mejoras en las condiciones acústicas frente a las anteriores iglesias renacentistas por varios motivos entre los que cabe destacar un menor volumen, una mayor ornamentación tanto de carácter permanente como efímera y la presencia de capillas laterales [1], [2].

La capilla del palacio de San Telmo es una obra de marcado carácter barroco, que el maestro Leonardo de Figueroa desarrolla en su etapa de mayor madurez, dentro del contexto de su intervención en el proceso de las obras sobre dicho palacio, entre los años 1721 y 1724.

La figura de Leonardo de Figueroa es fundamental para conocer el barroco andaluz y más concretamente el barroco sevillano, de la que fue maestro transcendental, tanto por el gran número de intervenciones como por la calidad de las mismas. En sus obras Leonardo de Figueroa desarrolla un lenguaje muy particular adaptando toda la ornamentación propia del barroco a los materiales y sistemas constructivos existentes en su ámbito de trabajo desarrollando en sus obras el empleo de ladrillo avitolado con la práctica eliminación de juntas verticales e intensificando las horizontales, así como, la aplicación de cerámica policromada en remates de cúpulas, tejados, espadañas, campanarios y capiteles.

Los orígenes del palacio de San Telmo datan del año 1681, cuando bajo el auspicio de la Corona se funda el colegio seminario para niños huérfanos con el objetivo de enseñarles el oficio de la marinería. En 1682 se inicia la construcción a las afueras de la ciudad bajo la dirección del maestro Antonio Rodríguez hasta el año 1713 cuando fallece quedando las obras paralizadas. Tras un periodo de inactividad Leonardo de Figueroa se hace cargo de las obras entre los años 1721 y 1724, cambiando el eje central del edificio formado por la portada, el zaguán, el claustro principal y la capilla.

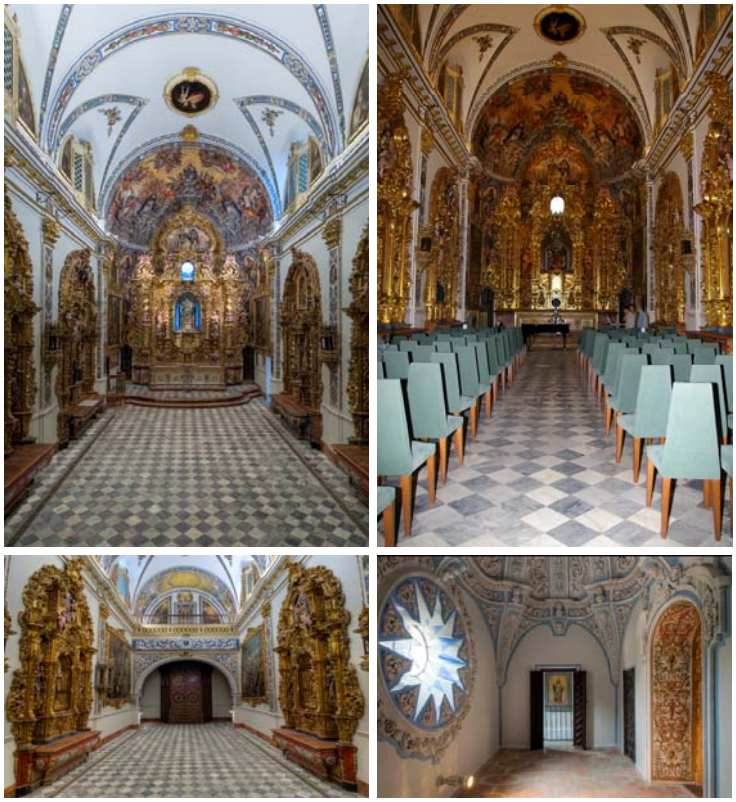


**Figura 1.** Imágenes interiores de la nave de la capilla. Vista sup. izqda. desde el acceso principal hacia el altar. Vista sup. dcha. desde el acceso principal hacia el altar. Ubicación de las sillas tapizadas y el piano. Vista izq. inf. desde el altar hacia el coro y dcha. inf. Camarín tras el altar.

Dicha capilla está formada por una única nave con bóvedas de cañón y lunetos, manteniendo una configuración ya repetida en obras anteriores con ligeras variaciones como lo son el uso de pilastras corintias enmarcando los cuatro retablos y los dos cuadros en alzados laterales.

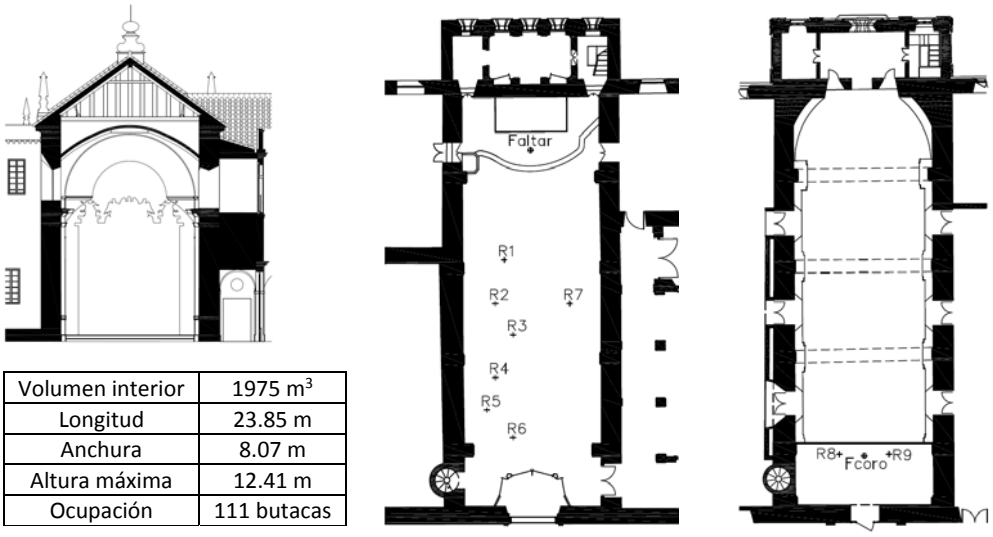
Los accesos se realizan desde los pies de la nave a través de un cancel de madera que comunica con el claustro del palacio y bajo la posición del coro. Por otra parte, destaca como particularidad la conexión de la capilla a través de balcones laterales en la planta primera del palacio, así como puertas laterales en el altar (ver Figura 1).

Entre los retablos cobra especial relevancia el principal de madera policromada ocupando gran parte de la superficie de la cabecera, que cuenta con un camarín, destacando en el mismo la cúpula de su recinto alto de configuración ondulada, siendo este elemento una singularidad en la arquitectura barroca sevillana. Actualmente la capilla no cuenta con asientos fijos, sino con unas sillas tapizadas que se colocan para la celebración de los actos institucionales y conciertos para lo que también se cuenta con un piano que se coloca próximo al altar.

La actual configuración de la capilla se mantiene fiel a la original tanto en su configuración arquitectónica como en las obras de arte que aloja gracias a la labor del IAPH (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico) que entre los años 2005 y 2010 lleva a cabo un proceso integral de rehabilitación [3] [4].

## MEDICIÓN ACÚSTICA *IN SITU*

Se realiza la medición de los parámetros acústicos de la capilla siguiendo el procedimiento que se indica en la normativa UNE-EN-ISO-3382-1:2010. [5] con el recinto vacío de ocupantes y tanto con las sillas tapizadas como con el piano que se coloca para los actos institucionales. Se realizan las medidas para las fuentes ubicadas en las dos posiciones que se consideran más significativas, el altar y el coro ambas a 1.50 m de altura simulando la altura del orador. Por otra parte, los receptores son distribuidos de manera homogénea en el recinto de la capilla en las posiciones de las sillas existentes a 1.20 m sobre el nivel del suelo y considerando la simetría existente en la configuración de la sala con respecto a las fuentes. Se monitorizan las condiciones ambientales durante el periodo de medida, manteniendose constantes tanto la temperatura en 22.4 ºC como la humedad relativa al 56%. Se establece una posición para el receptor (R7) que permite verificar el comportamiento simétrico de la sala en cuanto a su acústica. El espectro del ruido de fondo se registró durante cuatro minutos en el punto del receptor R3, que dio lugar a un índice NR de 30. La posición de fuentes y receptores pueden apreciarse en las plantas dispuestas en la figura 2.




| | |
|---|---|
| Volumen interior | 1975 $m^3$ |
| Longitud | 23.85 m |
| Anchura | 8.07 m |
| Altura máxima | 12.41 m |
| Ocupación | 111 butacas |

**Figura 2.** Sección trasversal (izqda.), planta baja (centro) y alta (drcha.) de la capilla del Palacio de San Telmo. Posición de fuentes (F) y receptores (R) para medición in situ y datos geométricos y de aforo.

En cada receptor otenemos respuesta al impulso (RI) a partir de barridos de señales de ondas sinusoidales incrementandose exponencialmente con el timepo la frecuencia El rango de frecuencia y la duración de cada barrido se ajustan para adaptarse a las condiciones del entorno, de manera que la relación señal/ruido impulsiva supere los 45dB en todas las bandas de octavas analizadas desde 63 a 16000 Hz. Es a partir de estas RI de donde se derivan los distintos parámetros acústicos que se analizan.

El proceso de generación de la señal, registro de la respuesta y análisis de la misma se ha realizado mediante el sistema WinMLS2004 sobre una tarjeta de sonido Edirol UA 101 de Roland. La señal generada alimenta al amplificador de potencia Beringher Eurolive B1800D-Pro y se reproduce en la capilla por una fuente omnidirecional AVM D012 de 01dB.

Para las RI se utilizan un micrófono multipatrón AT4050 de Audio-Technica con configuiración omnidireccional contectado a fuente de polarización Soundfield (SMP 200). Para la obtención de los parámetros relacionados con la impresión espacial se utiliza el mismo micrófono multipatrón AT4050 de Audio-Technica tomando la posición del patrón de directividad en figura de ocho, conectando a la fuente de polarización Soundfield (SMP 200). Los parámetros relacionados con la impresión espcial se miden utilizando el simulador de torso HMS III de

Head Acoustic, junto con el acondicionador de señal B&K 2829. Por último el ruido de fondo se registra empleando un micrófono B&K 4165 de Bruel & Kjaer conectado al analizador de ruido SVAN 958 de SVantek.

## SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO

En primer lugar se procede a la elaboración de un modelo tridimensional del interior de la capilla empleando el programa SketchUp 2014. Este modelo es exportado desde el programa de simulación acústica CATT- Acoustic, desarrollado por la empresa CATT (*Computer Aided Theatre Technique*) de Gothenburg (Suecia), con dos motores de cálculo diferentes: *CATT-Acoustic* v.9.0c y *TUCT* v1.1ª El programa *CATT-Acoustic* v.9.0c es donde se genera la geometría del recinto, donde se asignan los coeficientes de absorción y dispersión de las superficies que revisten la capilla y se definen las posiciones y características de las fuentes y los receptores de manera que tanto unos como otros sean coincidentes con los considerados para las mediciones in situ, con variaciones en cuanto a las distanticas entre emisor y receptor inferiores a 20 cm. En la medición *in situ* se consideran únicamente nueve receptores, ampliando a catorce para el modelo ya que se introducen nuevos en los puntos que mantenían simetría con los medidos con respecto a las fuentes y al eje principal de la capilla. Para la fuente situada en el coro se eliminan en el modelo los receptores 5, 6, 13 y 14 por no contar estos con sonido directo desde la fuente, aspecto también considerado en la medición *in situ*.

Por último, se introducen las condiciones ambientales medidas en los ensayos de campo, en concreto una temperatura de 22.4ºC, humedad relativa del 56% y densidad del aire de 1.15 kg/m$^3$. Se considera para el cálculo los valores para cada banda de octava del ruido de fondo medido in situ. El modelo del recinto, con un volumen de 1.975 m$^3$, estaba compuesto por un total de 366 planos, que constituyen una superficie de revestimientos de 1.186,80 m$^3$.

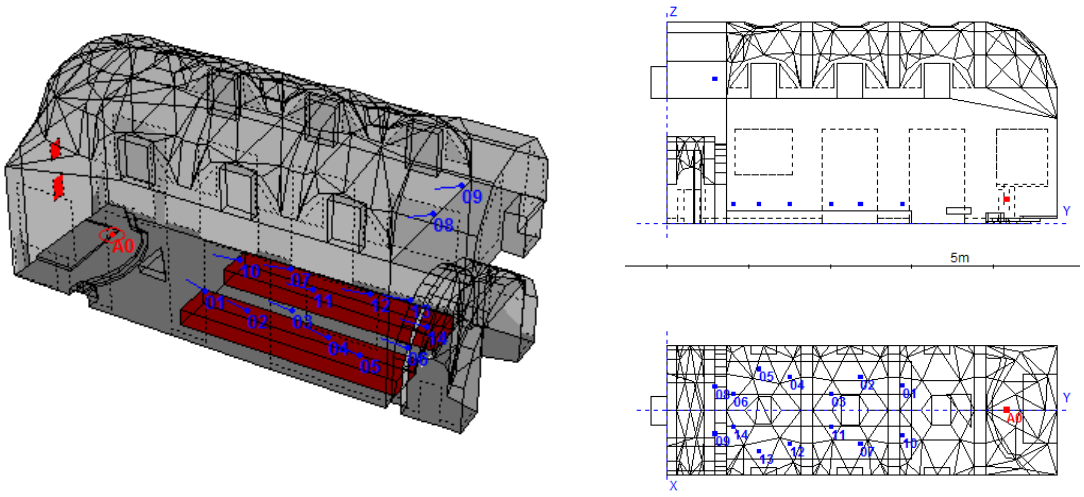



**Figura 3**. Modelo tridimensional Capilla del palacio de San Telm ıres.
Imagen izq. Motor TUCT e imagen drcha. CATT-Acoustic v9.0c.

Una vez introducidos los datos CATT-Acoustic exporta los datos a un fichero (*.CAG) que usará el motor de cálculo *TUCT.* Se ha optado por el cálculo del algoritmo 2 donde el sonido directo y las reflexiones especulares de primer orden son siempre tratados de un modo determinista, no utilizando técnicas de trazados de rayos. Las reflexiones difusas de primer orden se tratan de igual forma, para lo que introduce un proceso aleatorio de división de rayos *(random Split-up*) estudiando en función de la frecuencia el sonido reflejado de manera difusa.

Se han considerado para el cálculo realizado con el motor CATT TUCT v1.1.a los siguientes parámetros de cálculo:

- Algoritmo de cálculo: 2, cálculo completo.

- Número de rayos/conos: 25.536
- Ecograma / respuesta al impulso: 1805,8 ms
- Absorción del aire: activada
- Difracción: activada
- Tiempo de cálculo: 4 horas, 36 minutos

## VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez introducidos los datos del modelo en el programa de cálculo, con el fin de asegurar que el comportamiento del modelo se asemeja al real, es necesario validarlo para ajustar los resultados obtenidos en la medición *in situ*, de manera que su comportamiento sea muy similar al que posee realmente el espacio eclesial. Para obtener este objetivo es necesario modificar los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales, especialmente de aquellos que presentan mayor incertidumbre. Este ajuste se realiza para el tiempo de reverberación ($T_{30}$) simulado con los valores medidos in situ para las distintas bandas de octava. Como criterio de validación se estima que la coincidencia es adecuada si estos difieren menos del 5% de los valores medidos en cada banda de octava, que corresponde al umbral perceptible, Just Noticiable Difference (JND), [6]

**Tabla 1.** Coeficientes de absorción sonora (*α* arriba) y coeficientes de difusión sonora (*s* abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

| MATERIAL | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MÁRMOL [8] | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| HUECO (Camarín) | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PUERTA MADERA [8] | 14 | 10 | 6 | 8 | 10 | 10 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| VIDRIERAS [8] | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| RETABLO [9] | 12 | 12 | 15 | 15 | 18 | 18 |
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| REVOCO DE CAL(*) | 22 | 21 | 17 | 14 | 13 | 10 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| SILLA TAPIZADAS VACÍAS [8] | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 35 |
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| SILLA TAPIZADAS OCUPADAS [8] | 70 | 76 | 81 | 84 | 84 | 81 |
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| LIENZO [10] | 1 | 1 | 1 | 10 | 20 | 45 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| CELOSÍA DE MADERA [11] | 20 | 15 | 12 | 10 | 10 | 10 |
| | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

* Material modificado.

El ajuste se ha realizado calculando el tiempo de reverberación con el motor de cálculo CATT TUCT v1.1a hasta obtener tiempos de reverberación similares a los medidos *in situ* con la capilla vacía y la fuente ubicada en el altar. A este respecto hay que indicar que en las mediciones realizadas se obtuvieron mayores tiempos de reverberación ($T_{30}$) con la fuente situada en el coro frente a la fuente ubicada en el altar [7], debido a los huecos que presenta el altar mayor y que conecta con el camarín. Es por este motivo por lo que se decide realizar el ajuste del modelo con la fuente situada en el altar analizando posteriormente la posición de la fuente en el coro y verificando la idoneidad de los resultados para ambas fuentes.

A los distintos materiales que configuran la capilla se le asignan coeficientes de absorción y dispersión teniendo en cuenta los valores que se reflejan en la literatura específica. Se parten de estos materiales procediendo para el ajuste del modelo a la modificación de los coeficientes de absorción para aquellos que presentan mayor incertidumbre. En concreto se opta por validar el modelo modificando los coeficientes de absorción para el “revoco de cal”, ya que representa el mayor porcentaje de superficie (53.5%) y cuya composición del paquete constructivo es en

menor medida asimilable a materiales existentes. Para el resto de materiales, tales como el mármol, las sillas tapizadas, los vidrios, madera y altares se consideran los valores de la bibliografía, siendo todas estas superficies notablemente inferiores a la del revoco de cal. Con respecto a los coeficientes de dispersión de los materiales, se opta por considerar dispersiones por defecto del 10% salvo para el hueco de comunicación con el camarín tras el altar, los retablos y las sillas tapizadas. Se ha analizado las posibles variaciones del valor por defecto determinando que no supone variaciones significativas en los resultados obtenidos en los distintos parámetros de sala analizados. Los coeficientes de absorción y dispersión utilizados se reflejan en la Tabla 1 para la fuente situada en el altar.

El modelo, una vez validado, se ha estudiado considerando las sillas ocupadas al 100% (Tabla 1) con el objetivo de conocer la influencia de la ocupación del recinto.

## RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para los distintos parámetros acústicos que definen las características subjetivas del recinto, contrastando los resultados a partir de la modelización, con la RI que se obtiene en la medición *in situ* realizada previamente.

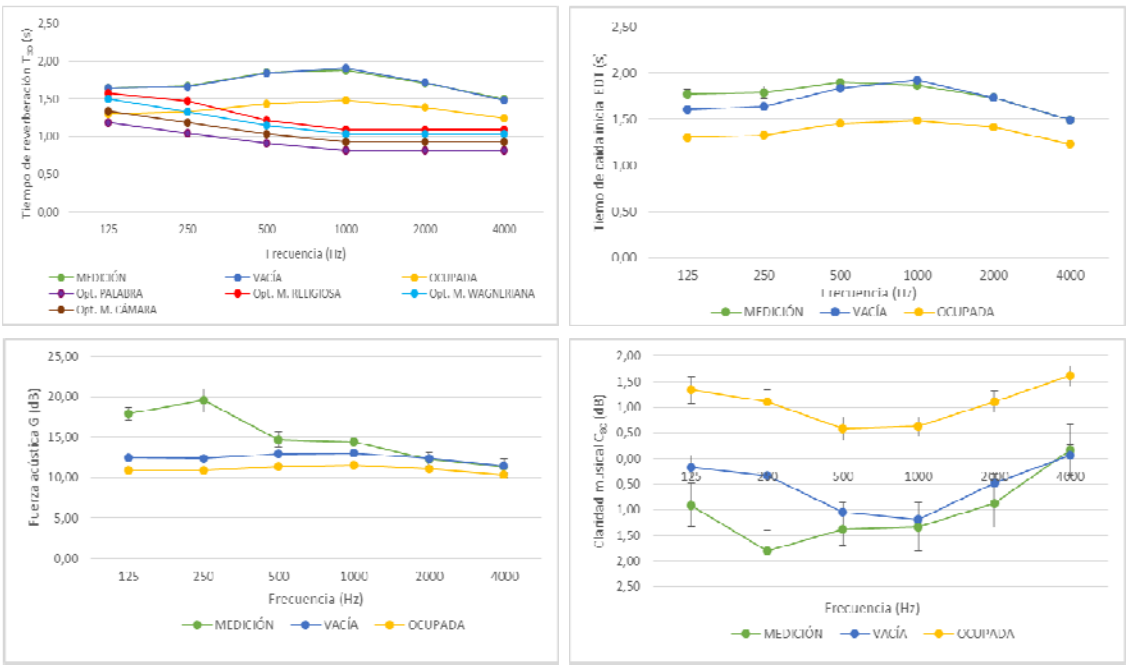



**Figura 4**. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el altar. Tiempo de reverberación ($T_{30}$), Tiempo de reverberación inicial (EDT), Fuerza Acústica (G), Claridad musical ($C_{80}$).

En la figura 4 se muestran los valores de varios parámetros monoaurales frente a la frecuencia, junto los errores estándar, con la fuente ubicada en el altar Para el tiempo de reverberación $T_{30}$ se comparan los resultados del tiempo de reverberación obtenidos en la medición *in situ* con los simulados para la capilla vacía obteniendo diferencias en todas las bandas de frecuencias entre el 0% y el 2%, inferiores al JND para validar el modelo. Por otra parte en el modelo realizado se introduce la posibilidad de considerar las sillas ocupadas, disminuyendo el tiempo de reverberación en torno a 0.30-0.40 s y por tanto aproximándose en mejor medida a los valores que se consideran óptimos para distintos tipos de música y para la palabra, especialmente en las bajas y altas frecuencias.

Los resultados obtenidos con el modelo calibrado para el resto de parámetros de sala presentan diferencias inferiores a 2 JND con respecto a los valores medidos en cada banda de

octava. En la gran mayoría de los casos esta diferencia es menor que un JND, con peores resultados a bajas frecuencias, que ocasionalmente superan los dos JND. No obstante, es necesario considerar que el algoritmo de cálculo que utiliza el programa presenta limitaciones a frecuencias inferiores a $4f_s$, siendo $f_s$ la frecuencia de Schröeder. El valor de la misma para las condiciones de reverberación y volumen de la capilla es de 62.03 por lo que las limitaciones en cuanto a la valoración de los resultados son más fiables a partir de los 250 Hz, donde se observan los mejores ajustes.

En la figura 5 se representan los valores de $J_{LF}$ que hacen referencia al ancho aparente de la fuente y parámetros binaurales, superando los valores de 2JND en las bandas de octavas analizadas, no así para los valores de $IACC_E$, donde es inferior a 2JND en todas las bandas superiores a 250 Hz salvo para las altas frecuencias a 4000 Hz.

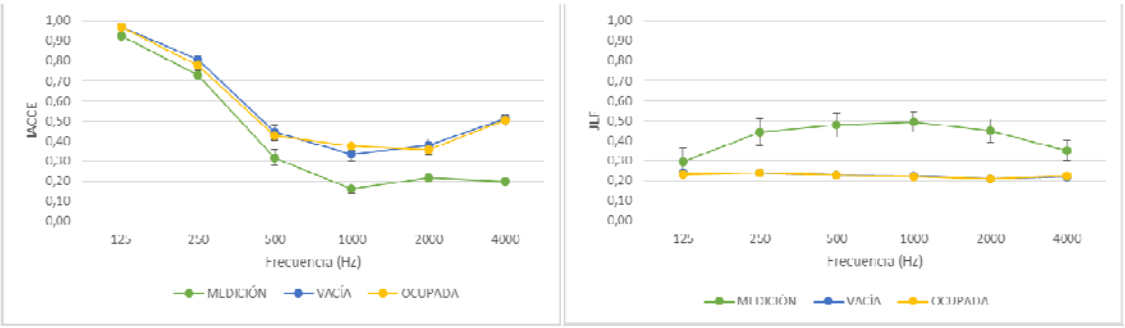



**Figura 5**. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el altar. Coeficiente de correlación cruzada interaural temprana ($IACC_E$), Energía Lateral precoz ($J_{LF}$).

Los valores del coeficiente de absorción obtenidos para el "revoco de cal" distan mucho de los esperados para un verdadero revoco de cal, muy poco absorbente a todas las frecuencias, si bien es verdad que se desconocen los tratamientos realizados sobre el material en el proceso de rehabilitación, que además presentan frescos sobre algunas zonas. Este aumento considerable de la absorción puede explicar las grandes diferencias encoontradas en la Energía lateral precoz.

## FUENTE SONORA EN EL CORO

Una vez realizada la validación del modelo se ha procedido a verificar los resultados que se obtienen con la fuente situada en el coro y modificando los coeficientes de absorción para el revoco de cal hasta garantizar un cumplimiento en los ajustes del $T_{30}$ con variaciones al 5%, como se propone para la fuente en el altar. Se utilizan los mismos coeficientes salvo para el revoco de cal que quedan ligeramente modificados como se recoge en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Coeficientes de absorción sonora (α arriba) y coeficientes de difusión sonora (*s* abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

| MATERIAL | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| REVOCO DE CAL(*) | 19<br>10 | 18<br>10 | 15<br>10 | 12<br>10 | 10<br>10 | 6<br>10 |

* Materiales modificados.

En la figura 6 se representan los tiempos de reverbaración ajustados en el modelo realizado con la fuente situada en el coro. Para este caso ha sido necesario disminuir ligeramente los coeficientes de absorción correspondientes a la fuente del altar, ya que como se observó en las mediciones *in situ* los tiempos de reverberación en este punto son ligeramente superiores a los obtenidos con la fuente en el altar. Para los valores considerados los tiempos de reverberación se ajustan en todas las bandas por debajo del 5%, en torno al 3-4% por lo que el modelo se considera adecuadamente validado.

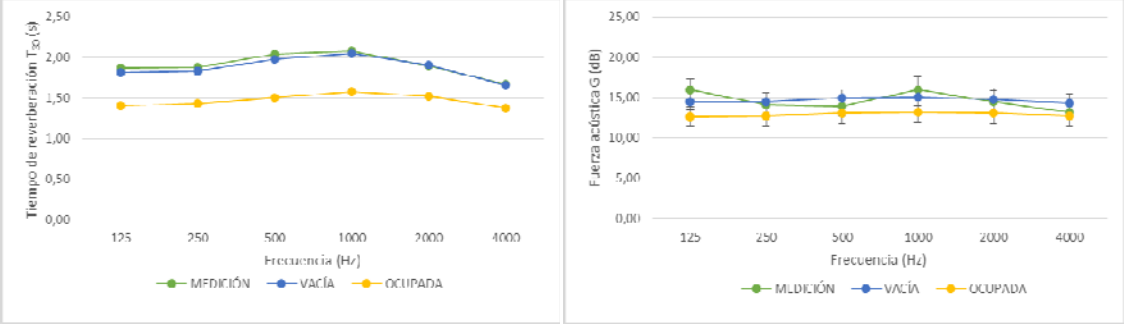



**Figura 6**. Comportamiento en frecuencia para algunos parámetros frente a la frecuencia y promediados especialmente para las posiciones para la fuente en el coro. Tiempo de Reverberación $T_{30}$, Fuerza Acústica G.

## CONCLUSIONES

El método de validación del modelo a partir de los medidos del tiempo de reverberación permite recrear el ambiente sonoro, pese a las limitaciones en frecuencia e incertidumbres acústicas de los materiales y del recinto.

Por este motivo, los valores obtenidos en el ajuste de los coeficientes de absorción y dispersión, no siempre deben ser los correspondientes al material ejecutado in situ.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al estudio de Vázquez Consuegra su colaboración por los planos de la capilla y a la Institución del Palacio de San Telmo por el acceso para las medidas.

## REFERENCIAS

[1] Cirillo, E. y Martellotta, F. Worship, acoustics and architecture. Brentwood, Essex: Multi-Science Publishing CO. LTD, (2006).
[2] Sendra, J. J. y Navarro, J. La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco. Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, (1997).
[3] http://www.juntadeandalucia.es/organismos/presidencia/areas/san-telmo/recuperacion/paginas/galeria-imagenes.html (visitada 05/09/2014).
[4] http://www.iaph.es/web/canales/conservacion-y-restauracion/proyectos-destacados/san-telmo.html (visitada 05/09/2014).
[5] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).”
[6] Galindo, M., Zamarreño, T., Girón, S. Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches, J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1207-1218 (2009).
[7] Alberdi, E., Galindo, M., León, A. L., Bueno, A. El ambiente sonoro en la capilla del palacio de San Telmo de Sevilla, Tecniacustica 2014.
[8] Vorländer, M. Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag; 2008.
[9] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter’s Basilica in Rome. J Acoust Soc Am 2009;126:1175-86.
[10] Martellotta, F., Castiglione, M. L. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. Proceedings of the Forum Acusticum 2014.
[11] Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC). Ensayo interno.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
SIMPOSIO EUROPEO SOBRE
ACÚSTICA VIRTUAL Y AMBISONICS

# VIRTUAL ACOUSTICS OF THE ROMAN THEATRE OF REGINA TURDULORUM

**PACS**: 43.55.Ka

Álvarez-Corbacho, A.; Zamarreño, T.; Galindo, M.; Girón, S.; Bustamante, P.
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Av. Reina Mercedes 2, 41012 - Sevilla, España, Tel: +34 954556612, Fax: +34 954557892, E-mails: arqangel@us.es; teofilo@us.es; mgalindo@us.es; sgiron@us.es; bustamante@us.es

## ABSTRACT

Plinius ascribes the town of Regina (Casas de Reina, Badajoz) to the old region of *Beturia* under the rule of the district of *Corduba*. Its Roman theatre is almost perfect according to the canon rules and has been kept in an excellent state, both in its tiers and in its stage. In this work, the theatre is studied by means of acoustic simulation, which responds to the classical schema: *cavea*, *orchestra*, *scenae*, and a capacity of up to 1,000 spectators. Throughout this paper, an analysis is performed on the creation, adjustment, and validation process of the 3D model of the theatre for the simulation of its sound field, which is based on the experimental measurement of reverberation time. Once validated, the initial model is modified in order to assess the acoustic impact of various proposed interventions.

## RESUMEN

Plinio adscribe la ciudad de Regina (Casas de Reina, Badajoz) a la antigua región de la *Beturia* bajo la autoridad del convento jurídico de *Corduba*. Su teatro es casi canónico y se conserva en excelente estado, tanto en gradas como en el frente escénico. En este trabajo el teatro se estudia mediante simulación acústica el cual responde al esquema clásico: *cavea*, *orchestra*, *scenae*, y un aforo de hasta 1000 espectadores. A lo largo de la comunicación se analiza el proceso de creación, ajuste y validación del modelo 3D del teatro para la simulación de su campo sonoro, apoyado en los ensayos experimentales del tiempo de reverberación. Una vez validado, el modelo inicial se ha modificado con objeto de evaluar el impacto acústico de varias intervenciones propuestas.

## INTRODUCTION

Greek and Roman theatres are the only monuments of classical antiquity that, in some cases, serve the purpose for which they were originally designed: as places to perform theatrical performances. These public buildings were of major importance in the Greek and Roman eras.

Although most of these constructions are located in the Mediterranean area, they were built in the major cities of the ancient world not only in Europe, but also in the Middle East, North Africa and beyond. On an east-west axis, they extend from Alexandria of Oxo (today Ai Khanum,

Afghanistan), on the threshold of the Indian subcontinent, to Lisbon, and, on a north-south axis, from the Roman colonies in England to Ptolemais in southern Egypt [1].




**Figure 1.** Theatres in Antiquity in Europe and north of Africa. (*Ancient Theatre Archive. http://www.whitman.edu/theatre/theatretour/home.htm).*

To date, 744 structures of ancient theatres have been identified and documented (Figure 1), of which 194 correspond to Greek theatres, while 425 theatres and 46 odeons belong to the Roman era; of the remaining 76, their precise Greek or Roman origins remain unknown. These theatres comprise a simple structure consisting of a large void where spectators sat (*cavea*), an intermediate zone where the action took place (*orchestra*), and the stage area (*scena*). In all probability, these buildings provide the first examples of how architectural acoustics themselves can sustain and improve oral and even musical communication in places of major capacity, thereby allowing a perfect reproduction of the dialogues for more than 10,000 spectators [2].

Ever since Vitrubio [3] in the 2nd century BC, there have been numerous studies on the acoustics of both Greek and Roman classical theatres. It should be noted that the Greek theatre of Epidaurus (Greece) and the Roman theatre of Aspendos (Turkey) have been the focus of the majority of these studies. The techniques employed range from a basic interpretation of the sound propagation made by Vitrubio, to the modern computer techniques that, by means of acoustic simulation, model these theatres. In this context, the ERATO project [4] should be highlighted, which was financed by the European Union and lasted three years. One of the objectives of this project was to investigate the acoustics of outdoor theatres and odeons. To this end, virtual reconstructions were carried out using computer models of these spaces, which remained faithful to the archaeological information available thereof. In addition, this project implemented auralisations of a number of theatres by using musical instruments and musical pieces of the time. The aim pursued was none other than the development of conservation and restoration of architectural heritage that takes into account its acoustic characteristics.

Along the lines of the study developed on the acoustics of the Roman theatre of Italica [5], the 3D acoustic model has been created in this work, using the software CATT-Acoustic v9.0c, of the Roman theatre of the archaeological complex of Regina, municipality of Casas de Reina (Badajoz, Spain). The model has been adjusted based on the measurements made in situ of the reverberation time, and the influence of the dispersion coefficients of its surfaces are analysed for its validation.

## THE CITY OF REGINA

Baeturia was a large territory located in the southwest of the Iberian Peninsula, and accurately defined by Pliny in his Natural History [6] as "the territory between the rivers Baetis (Guadalquivir) and Anas (Guadiana)". In this territory, two parts were known, one occupied by the Celts (Baeturia Celticorum) and another by the Turdili people (Baeturia Turdulorum). Located in the western zone, the Baeturia Celticorum bordered Lusitania and judicially depended on the conventus hispalensis. Baeturia Turdulorum, bordering both Lusitania and Tarraconense, judicially depended on the *conventus cordubensis.* In this territory, Plinio [7] includes six cities defined as "oppida non ignobilia" (populations that are still notable), one of which is Regina.

Regina is mentioned in Roman times in the itinerary of Antonino as "mansio" of the road that linked Emerita Augusta and Astigi (Figure 2).This provided one more way to reach Hispalis or Corduba [8], and this route (via X of Antonino) indirectly connected the capital of Lusitania with the capital of Betica. The city of Regina is located about 2 km east of the town of Casas de Reina and lies within its municipal area, in the current southern countryside of the province of Badajoz.

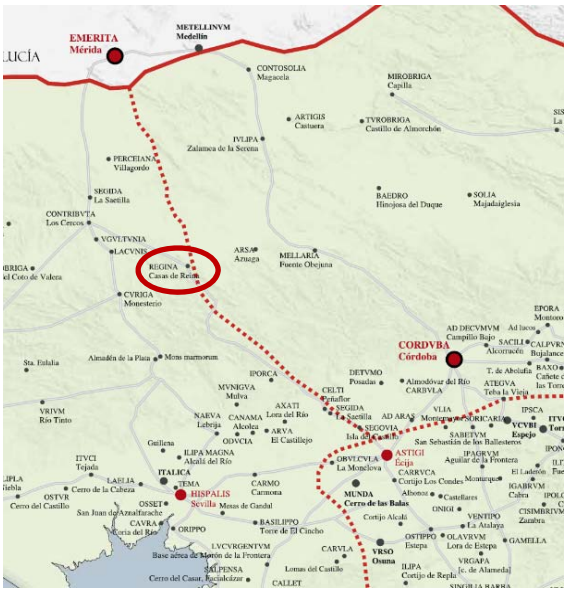



**Figure 2**. Network of ancient roads around Regina. (Atlas of the History of the Territory of Andalusia, Atlas of Andalusia, Institute of Cartography of Andalusia, Junta de Andalucía).

## THE ROMAN THEATRE OF REGINA

The archaeological site of Regina, called "Los Paredones" by the locals, has been under investigation since 1978 [9], during which time its theatre, the main preserved monument, has been discovered. Work carried out has enabled the recovery of an exemplary building of the Hispano-Roman architecture of the second half of the 1st century AD, in a good state of conservation.

The theatre is the most emblematic building of ancient Regina (Figure 3). It is located at the north-western end of the city [9], on a gentle slope on which a good part of its cavea rests. It has a northeast orientation. The construction is made entirely of lime and stone mortar, *opus caementicium*, and the face of the whole work of *opus incertum*. Its cavea is composed of ten rows of sandstone seats, of which the first three, part of the fourth and some areas of the fifth row are preserved (Figure 4). The first step forms a kerb as a footrest. The grandstand is divided into four *cune*i (wedges) by three staircases. The total capacity of the cavea could be eight hundred spectators. In the high area there would probably have been a wooden stand or the space could simply have been crowned by a portico. Altogether, the *cavea* offers a total diameter of 53 m. The orchestra presents an almost semicircular floor of 16.40 m in diameter. The *proscaenium*, made of *opus incertum*, has a thickness of 1.17 m and an average height of one metre. The p*ulpitum* is 45 m long and 6 m wide. The stage consisted of a wooden platform supported by pillars symmetrically distributed at the base of the *hyposcaenium*. *The scaenae frons,* 39.40 m long, has a base, also in *opus incertum*, on which the columns supporting the entablature are arranged. In the wall of the *scaena*, three vaults open by which the actors entered.



**Figure 3.** Excavations in the campaign of 1980. (*J.M. Álvarez Martínez. Proceedings of Symposium: El Teatro Romano en la Hispania Romana. El Teatro de Regina. (1982)).*



**Figure 4**. State of the *cavea* before its rehabilitation.

The theatre of Regina, according to the data provided in its excavations [9], was abandoned from the middle of the fourth century AD. As for its date of construction, both for the structure of the building and for certain constructional details, it can be located in the Julio-Claudia era, in the time of Claudio-Nero, in the second half of the first century AD [9].



**Figure 5.** Current status during the performance of acoustic measurements.

In December 2013, a rehabilitation project was carried out on the stands (Figure 5), whereby they were reconstructed with a metal structure upon which a polyester sheet was placed that reproduced the shape and roughness of the stone. The theatre is currently in use, and the performances of the Regina Theatre Festival have been held for many years, the 11th edition in August 2015, in collaboration with the International Classical Theatre Festival of Merida.

## EXPERIMENTAL METHOD

Measurements were carried out on the theatre without the presence of any public (Figure 5). The environmental conditions were monitored by measuring temperature (18º to 20ºC) and the relative humidity (50% to 60%), and the recommendations of the ISO [10] were followed. Although the wind speed was not monitored, the slight intermittent gusts were an inconvenience when recording impulse responses (IR).

The process of generation of the frequency exponential sweep signal to excite the theatre, and the acquisition and the analysis of IRs were carried out with the Dirac 5 programme through the Edirol UA-101 sound card. The signal generated was emitted by the AVM DO-12 dodecahedral source with a B & K 2734 power amplifier, for three positions of the source located at 1.50 m above the floor of the *proscaenium* (2) and in the *orchestra* (1). These signals were recorded at 18 reception points (Figure 6), distributed across the *cavea* (11), the *proedria* of the orchestra (5), and the *proscaenium* (2). The monaural IRs were collected using an Audio-Technica AT4050/CM5 multipattern microphone (omnidirectional and figure-of-eight) connected to a 4-channel Sound Field SMP200 polarization source. The binaural IRs were obtained with a Head Acoustics HMS III torso simulator (Code 1323) and the B&K-2829 micro-polarization source. In all cases, the microphone was placed 1.20 m from the ground.

## ACOUSTIC MODEL AND SIMULATION

The acoustic simulation was carried out using the CATT-Acoustic v9.0c programme [11], based on geometric acoustic algorithms. The model was built using the available graphic documentation and the data collected in situ. For the geometric survey, a three-dimensional model was generated by the SketchUp programme, and finally exported to CATT-Acoustic through the SU2CATT v 1.3 plugin.

Results were obtained with the calculation engine TUCT v1.0h (The Universal Cone Tracer), which calculates the acoustic parameters from energy (E) and/or B-format and binaural impulse responses (h) based on the evaluation of sound pressure. Specifically, algorithm 2 has been chosen. The geometrical model, consisting of 1,588 plans, has dimensions of 62.7 x 40.7 $m^2$ in plan view and a height of 9.40 m, which would enclose a volume of 13,000 $m^3$ (under the imaginary plane that rests on its vertical limits), with a total surface of 6,307 $m^2$ (Figure 6a).

In order to adapt the acoustic conditions of the simulation to those of the real situation, the model has undergone an iterative tuning process in which the absorption and dispersion coefficients of the least known materials are adjusted. The process is concluded when the simulated reverberation times, spatially averaged in each octave band, differ by no more than 1 JND (5%)

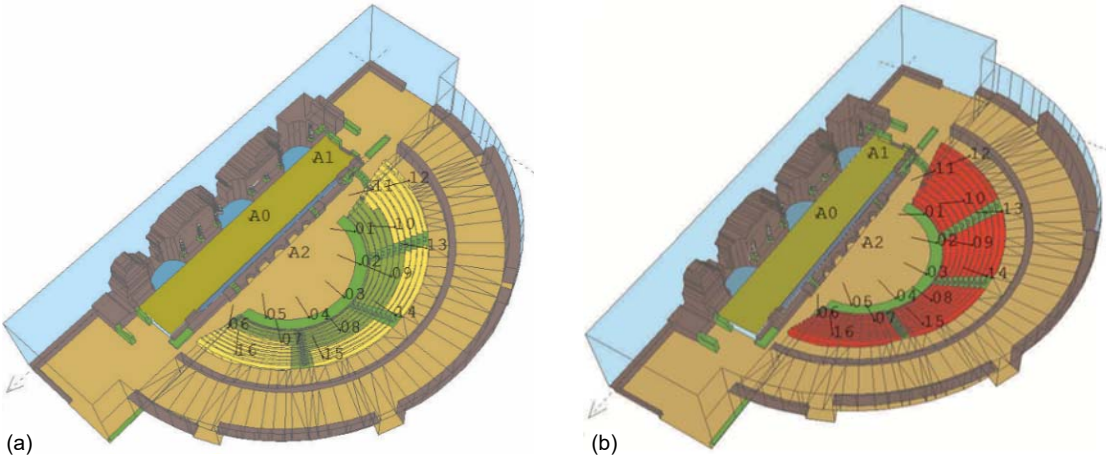



**Figure 6**. Computer model of the theatre: (a) in its current status; (b) idem under the hypothesis of occupancy.

from the corresponding values measured in situ. In this case, the calibration process has been especially complex, since it is an open space, the absorption of the upper closure plane dominates the rest of the surfaces and therefore the adjustment of the absorption coefficients fails to produce appreciable effects on the behaviour of the sound field. On the other hand, the geometry of the theatre, especially the *cavea,* assumes that the dispersion coefficients are significant for all the octave bands. Precisely the adjustment of these dispersion coefficients has provided the key to finally achieve the calibration of the model. To finish adjusting these values, full simulations were launched with 500,000 rays and an echogram duration of 1,400 ms, superior to the reverberation time measured in situ, and the algorithm 2 of TUCT was used.

**Table 1.** Areas, absorption (upper row) and dispersion (lower row) coefficients in octave bands of the materials for the simulation.

| Surface, [reference] | Area ($m^2$) | Area (%) | Colour (Fig. 6) | Absorption and dispersion coefficients | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k |
| Void | 3136.8 | 49.7 | | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| | | | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Land, [12] | 1108.8 | 17.6 | | 0.15 | 0.35 | 0.40 | 0.50 | 0.55 | 0.80 |
| | | | | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 |
| *Opus Caementicium*, [13] | 1000.4 | 15.9 | | 0.08 | 0.08 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.25 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.62 | 0.56 |
| Polyester tier, [12] | 261.3 | 4.1 | | 0.25 | 0.23 | 0.16 | 0.12 | 0.11 | 0.10 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.62 | 0.62 | 0.60 | 0.56 |
| Stone stairs, [14] | 257.0 | 4.1 | | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.07 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.62 | 0.56 |
| Wooden platform, [14] | 192.7 | 3.1 | | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| | | | | 0.35 | 0.35 | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.40 |
| *Cavea* stone, [14] | 188.2 | 3.0 | | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.07 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.62 | 0.62 | 0.60 | 0.56 |
| Mortar, [14] | 93.2 | 1.5 | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.05 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.62 | 0.56 |
| Stage metal grille, [13] | 29.1 | 0.5 | | 0.08 | 0.08 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.25 |
| | | | | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.62 | 0.56 |
| Marble columns, [14] | 26.5 | 0.4 | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| | | | | 0.35 | 0.35 | 0.45 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| Metal grille [12] | 13.1 | 0.2 | | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 |
| | | | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Seated audience, [14] | 449.5 | 7.1 | | 0.24 | 0.40 | 0.78 | 0.98 | 0.96 | 0.87 |
| | | | | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.70 |

Table 1 shows the absorption and dispersion coefficients finally assigned to the surfaces, the associated colours in Figure 6, and the bibliographic references used.

In the simulations carried out in the reconstruction hypothesis of the *cavea* with the same existing stony material, the type of polyester material in the stands is not considered. In the case of full capacity, the surfaces "polyester tiers" and "*cavea* stone" change to " audience seating".

Table 2 shows the results of the calibration process for spatially averaged $T_{30}$ values for source A0 (Figure 6a) centred on the *proscaenium*. It can be seen that for all octave bands, the differences obtained between the measured and simulated values are lower than 5%, that is, lower than 1 JND.

**Table 2**. Results of the calibration. Values of $T_{30}$ (s), spatially averaged for A0, in octave bands.

| Frequency (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Simulated values | 0.69 | 0.66 | 0.64 | 0.64 | 0.63 | 0.56 |
| In-situ measured values | 0.71 | 0.66 | 0.63 | 0.62 | 0.64 | 0.58 |
| Difference (%) | -2% | 0% | 1% | 2% | -1% | -2% |

## ANALYSIS AS A WHOLE

Figure 7 shows the spectral behaviour of the differences between the measured and simulated, spatially averaged values corresponding to the temporal, energy and binaural acoustic parameters. In order to make the differences for the different parameters comparable, they have been expressed in terms of their respective JND and the same vertical scale has been assigned to all four graphs.

We can observe that these differences, for all the parameters, are maintained in the range of ± 1 JND for all frequencies (in many cases, even within the range of ± 0.5 JND), except for the $IACC_E$, which presents more notable variations (between 1.5 and 2 JNDs) for the bands between 2000 and 4000 Hz, and $C_{80}$ in the 125 and 250 Hz bands (between 1.5 and 2.3 JNDs).

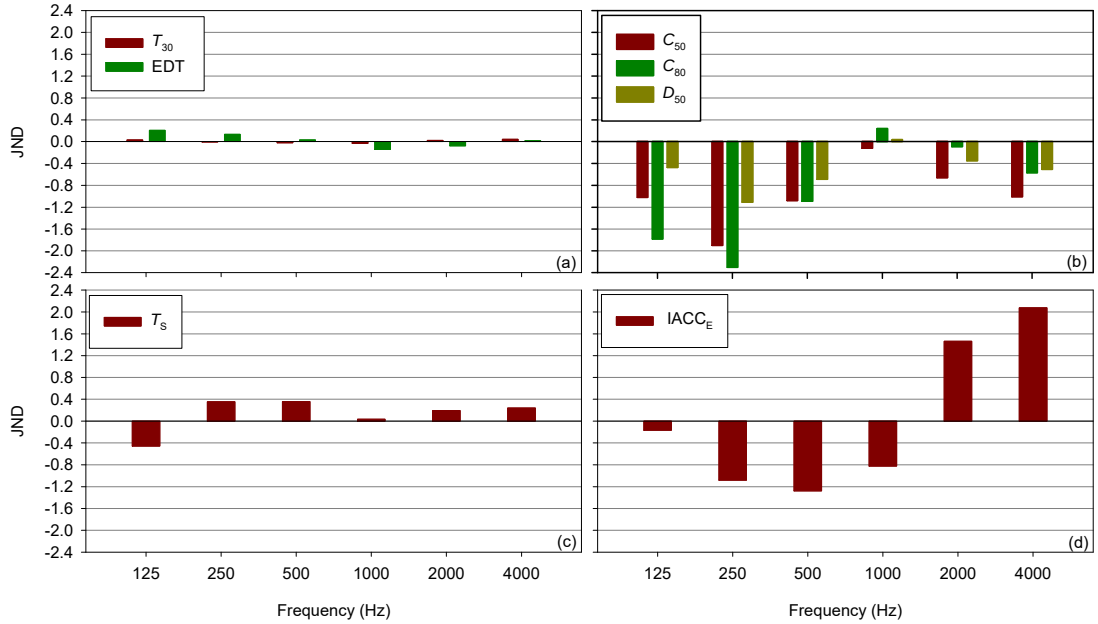



**Figure 7**. Spectral behaviour of the differences between the spatial average of the measured and simulated values of acoustic parameters: (a) $T_{30}$ and EDT; (b) $C_{50}$, $C_{80}$, and $D_{50}$; (c) $T_S$ and (d) $IACC_E$.

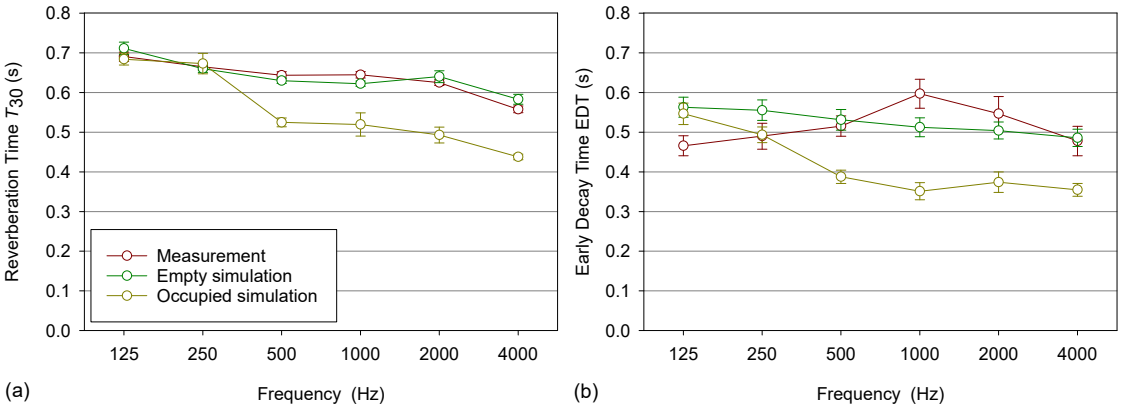



**Figure 8**. Spectral behaviour, spatially averaged, of measured values, and simulated values with the empty theatre, and with 100% occupancy: (a) for $T_{30}$ parameter, and (b) for EDT parameter. Vertical bars value the spatial dispersion through the standard error.

## STUDY OF OCCUPATION OF THE *CAVEA*

Figure 8 shows the spectral values of the reverberation parameters ($T_{30}$ and EDT) spatially averaged, both measured and simulated, and for the situations of an empty theatre (Figure 6a) and at full capacity (Figure 6b). The measured and simulated $T_{30}$ values are very similar under the empty theatre scenario (it must be taken into account that this is the parameter used to calibrate the model). The simulated EDT values reach their greatest difference in the frequencies of 125 Hz and 1000 Hz, which is practically the same in 500 Hz and 4000 Hz, although the difference always remains below 0.21 JND. The effect of the occupation of the tiers is evident as a notable decrease in both parameters, especially at medium and high frequencies.

## STUDY OF THE RECONSTRUCTION OF THE TIERS IN STONE

An analysis has been carried out on the effect that the reconstruction of part of the tiers of the *cavea* (with polyester material) produces on the acoustic parameters. By taking advantage of the model developed for the simulation, we worked on the hypothesis of an intervention that used the same type of stone as the rest of the stands. From the geometric point of view, there is no change in the surfaces studied; in order to describe the new model, it suffices to change the coefficients that describe the acoustic properties of the materials (Table 2).

Figure 9 shows the spectral behaviour, spatially averaged, of the simulated values of the reverberation time $T_{30}$ with the reconstruction of the grandstands in polyester and the hypothesis of said seating in stone. The result of the simulation shows that its effect is insignificant. We can see that both curves practically overlap in all octave bands, whereby the biggest difference is slightly less than 6% in the 250 Hz band, which is only 1 JND.

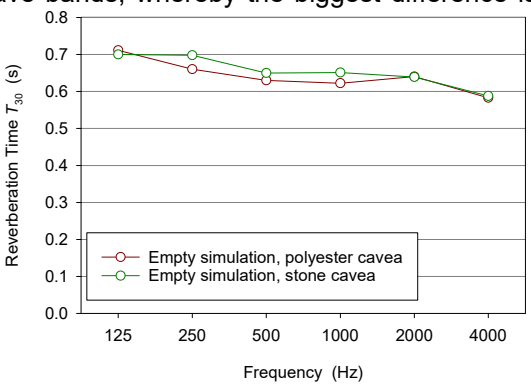



**Figure 9**. Spectral behaviour, spatially averaged, of $T_{30}$ simulated values with polyester and stone *cavea*.

## CONCLUSIONS

In this work, we have presented and discussed the process of making and adjusting a 3D model to simulate the acoustic field in the Roman theatre of the Archaeological complex of Regina Turdulorum in Casas de Reina (Badajoz). The model has been validated from the reverberation time values measured in situ, which has meant adjusting the dispersion coefficients of the surfaces of the model, since, for a plane with

maximum absorption, the adjustments of the absorption coefficients fail to produce appreciable effects on the values of the parameters. The effect of the rehabilitation of part of the grandstand in polyester material and the influence of the presence of the public on the *cavea* on the acoustic parameters have been discussed. The detailed analysis of the point-to-point differences, the use of the model generated in the evaluation of further configurations (past or present) and of possible future interventions, both from the parametric and sensorial point of view through auralisations, constitute aspects to be investigated in the future.

## ACKOWLEDGEMENTS

We would like to express our gratitude to the Directorate General of Cultural Heritage of the Ministry of Education and Culture of the Junta de Extremadura, which so kindly provided us with the essential planimetric documentation for the execution of this work. We also wish to thank Mr Agustín Castello Tena, Mayor of Casas de Reina, for granting access to the theatre for the realization of sketches and acoustic measurements.

## REFERENCES

[1] N.J. Mourjopoulos, P. Faust. *The Acoustics of the Ancient Theatres*. Acta Acustica United with Acustica. Vol.99 prefacio (2013).

[2] C.A. Gade, K. Angelakis. *Acoustics of ancient Greek and Roman theatres in use today*. 4th joint meeting of ASA and ASJ. Honolulu. Hawaii. Paper 3aAAb1. (2006).

[3] M. Vitruvio Polión. *Los diez libros de arquitectura*, traducidos del latín y comentados por J. Ortiz y Sanz. Imprenta Real, Madrid (1787).

[4] J.H. Rindel (Editor): ERATO, Final Report, INCO-MED project ICA3-CT-2002-10031. (2006). URL: http://server.oersted.dtu.dk/www/oldat/erato/EratoWebsiteMeetings.htm (not accesible currently).

[5] A. Álvarez-Corbacho, T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón. Virtual acoustics of the Roman theatre of Italica (*Acústica Virtual del teatro romano de Itálica)*. Proceedings of Tecniacústica. Murcia, 1229-1236 (2014).

[6] C. Plinio El Viejo. *Historia Natural. Libro III. De Hispania, Galia e Italia*, 13-14.

[7] C. Plinio El Viejo. *Historia Natural. Libro III. De Hispania, Galia e Italia*, 11.

[8] J.M. Álvarez Martínez, G. Rodríguez Martín, J.C. Saquete Chamizo*. La ciudad romana de Regina. Nuevas perspectivas sobre su configuración urbana*. Anas-17, 11-45 (2004).

[9] J.M. Álvarez Martínez*. La ciudad romana de Regina.* Acta de la I Jornada de Historia de Llerena. 51-56 (2000).

[10] ISO 3382-1:2009(E), Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, part 1: Performance rooms, International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland 2009.

[11] B.I.L. Dalenbäck. CATT-Acoustic v9 powered by TUCT user manuals. Computer Aided Theatre Technique, Gothenburg (Sweden), (2011).

[12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. http://www.ptb.de/en/org/1/17/172/datenbank.htm (visited 10/07/2015).

[13] J. Petersen. Rumakustik. Horshølm, 1984: s.n. Statens byggeforskningsinstitut. SBI-anvisning.

[14] M. Vorländer. *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Berlin, Springer-Verlag, (2008).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# ACÚSTICA VIRTUAL PATRIMONIAL. APLICACIÓN A LA AURALIZACIÓN DEL MISTERI D'ELX

**PACS**: 43.55.Ka

Planells, Ana; Segura, Jaume; Cerdá, Salvador; Barba, Arturo; Cibrián, Rosa; Giménez, Alicia.

Grupo de Investigación en Acústica Virtual Universitat Politècnica de València-Universitat de València. Edificio 5D, Camino de Vera s/n 46022 Valencia-Spain. acusvirt@upv.es

## ABSTRACT

Auralization of virtual spaces allows to analyze, compare and predict their acoustic behaviour under different conditions in order to improve it. This is an interesting study in any room but especially when it comes to heritage buildings.
This paper studies the acoustic particularities of the Basilica de Santa María d'Elx, scene of the Misteri, under normal conditions and when it is enabled for the play. We have used a singing recorded in a controlled and studied environment to obtain the auralization of the anechoic signal. In the paper, it is presented the obtained recording for a single voice. For this purpose, the recording has been processed, filtering the characteristics of the recording room (at each point) which will allow to obtain the real/anechoic sound emitted in the religious performance.

## RESUMEN

De las posibilidades que ofrece la acústica virtual, la auralización de señales en recintos virtualizados permite analizar, comparar y predecir su comportamiento en distintas condiciones para su posible mejora. Este estudio es de especial interés en salas en general pero más aún en los edificios patrimoniales.

En este trabajo se han analizado las particularidades acústicas de la Basílica de Santa Maria d'Elx, sede del Misteri, sin y con el acondicionamiento propio de la representación. Para la auralización de la señal anecoica se ha utilizado una grabación del canto en un contexto controlado y estudiado.
Se presenta el resultado obtenido para una voz. Para ello se ha procesado la grabación deconvolucionando las características propias de la sala de registro que va a permitir escuchar el sonido real emitido en la representación religiosa.

## INTRODUCCIÓN

Una de las características de los recintos de culto es su versatilidad de uso. Son espacios de reunión en los que tiene lugar la audición tanto de la palabra como de la música, por lo que se generan unas necesidades acústicas singulares al tratarse de diferentes tipos de señales con diferentes requerimientos. Así la acústica debe ser adecuada para la inteligibilidad de la palabra pero también apropiada para la música. Por este motivo es importante conocer el comportamiento acústico de estos espacios en ambos casos y las diferencias que se producen en función de la actividad que se está realizando [1].
En el caso de la basílica de Santa María de Elche, las variaciones en el uso del espacio adquieren especial importancia ya que además del culto y la celebración de conciertos, este entorno es el escenario en el que cada año se representa el "Misteri d'Elx", obra teatral de

origen medieval declarada Monumento Nacional en 1931 e incluida en la primera Proclamación de las Obras Maestras del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la Unesco en 2001, y que condicionó la traza del templo [2].

La basílica tiene planta de cruz latina, con una sola nave cubierta con bóveda de cañón y lunetos (bóveda secundaria en forma de media luna). A cada lado dispone de cuatro capillas y contrafuertes perforados permitiendo la circulación entre ellas y las comunica a su vez con el transepto y el deambulatorio que envuelve el ábside cubierto por una semicúpula. El crucero se cubre con una gran cúpula con tambor sobre pechinas. La circulación perimetral se repite en la planta superior a través de la tribuna situada sobre las capillas y el deambulatorio en la que se abren balcones al espacio central y los balcones corridos del transepto, en uno de los cuales se sitúa el órgano.

Para la representación del Misteri, la cúpula se cubre con una lona pintada que representa el cielo, se modifica la distribución del mobiliario y se colocan unas estructuras conocidas como tribunas y cadafal, que suponen una reconfiguración del espacio de la basílica y que puede modificar las características acústicas de la misma. Del mismo modo, el aforo en los días de la Festa, como se conoce también al Misteri, es considerablemente superior, ocupando prácticamente la totalidad de la planta inferior así como los balcones superiores, lo que repercutirá en un aumento significativo de la absorción durante la representación.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

### Construcción de los modelos

En una primera parte de este trabajo se ha querido analizar cómo influyen sobre el comportamiento acústico de la basílica las variaciones propias de cada uso. Dadas las diferencias en el acondicionamiento del espacio para el culto y para la representación teatral, se han construido dos modelos diferentes incluyendo las disparidades mencionadas, como se muestra en la figura 1. Para ello se ha combinado el uso de programa de diseño AutoCAD que cuenta con mayor grado de precisión y con el que se ha construido una estructura alámbrica. Posteriormente se ha exportado a SketchUp para conformar las superficies ya que este último admite caras con mayor número de lados reduciendo significativamente los polígonos necesarios para generar el modelo, además dispone de un plugin que permite exportar el modelo al software de simulación acústica.

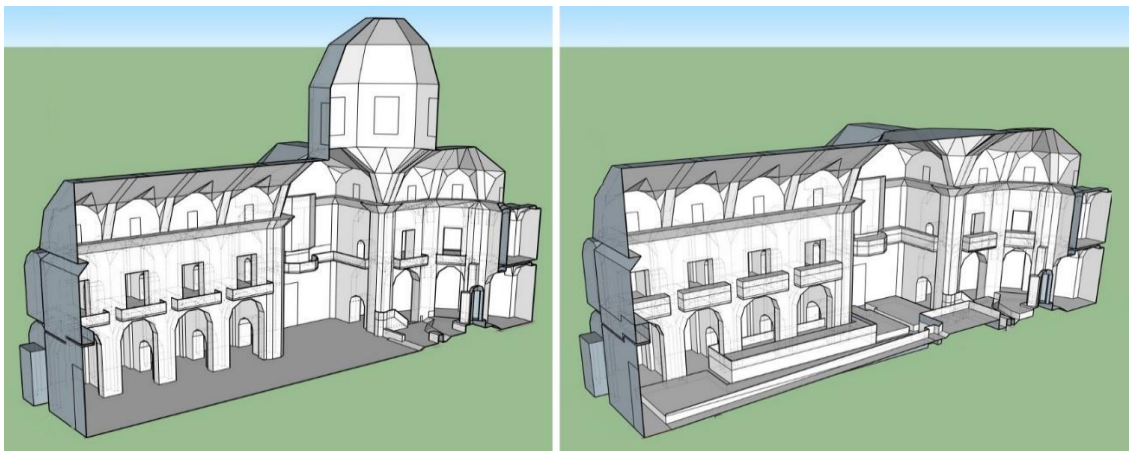


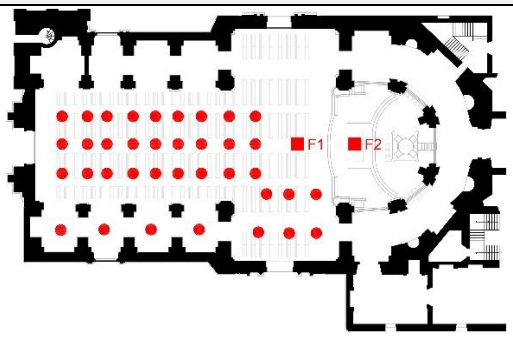
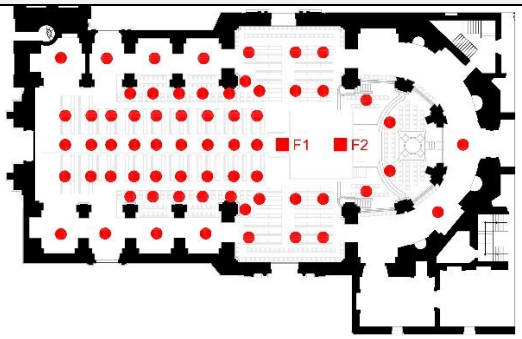
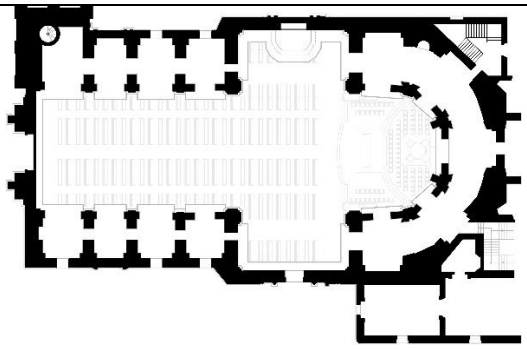
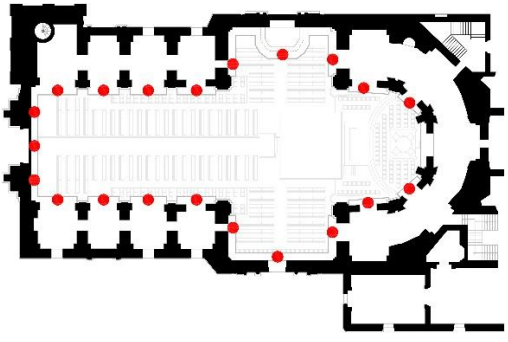
Figura 1. Modelos de la basílica para el uso de culto y la representación teatral. En el de la derecha se observan: cúpula cubierta tribunas y cadafal.

**Medición de parámetros acústicos**

La toma de datos acústicos en la basílica se ha realizado para las dos configuraciones, tanto en su estado habitual como una vez colocadas la lona y las estructuras propias del Misteri. Se ha realizado empleando dos fuentes fuente dodecaédricas DO12 (Rated power 600W, Sound Power>120dB, Rango de frecuencias: 80 Hz-6.3 kHz, directividad: casi esférica) que se han situado en el altar y en el centro de la cúpula respectivamente.

Se han utilizado tres tipos de micrófonos. Los parámetros monoaurales se han medido con micrófonos G.R.A.S. tipo 40 AK (Sensitividad a 250Hz 50 mV/Pa, Rango de frecuencias: 3.15 Hz-20 kHz, Límite superior de rango dinámico (3% Distorsión): 164 dBre. 20µPa, Límite inferior de rango dinámico: 14 dB, re. 20µ Pa). Los parámetros espaciales con micrófono multipatrón AT4050/CM5 (rango de frecuencias: 20–20000 Hz, sensitividad: 15.8 mV, patrones polares: cardioide, omni direccional, figura-de-ocho) y su correspondiente fuente de alimentación phantom. Por último, la medida de los parámetros binaurales se ha realizado con una cabeza HMS III.0 (rango de frecuencias: 3 Hz-20 kHz, −3 dB/+0.1 dB; rango dinámico: typ. >118 dB, max SPL 145 dB). La adquisición y posterior cálculo de medidas se ha realizado con el software WinMLS.

Tabla 1. Situación de las fuentes y los puntos de medida en plantas baja y primera con la distribución propia del culto y la de la representación del Misteri

| | Culto | Misteri |
|---|---|---|
| PB |   |   |
| P1 |  |  |

En el caso de la basílica acondicionada para el culto se han establecido 36 posiciones de receptor, todos ellos en la planta baja ya que la superior no suele utilizarse. Las posiciones se han distribuido entre la nave central, las cuatro capillas del lado de la epístola y uno de los laterales del transepto como se muestra en la Tabla 1. En la misma tabla se observa que, aunque no se han utilizado para la comparativa que se muestra en este trabajo, en el caso del Misteri se ha aumentado el número de posiciones de receptor añadiendo las capillas y transepto del otro lado y estableciendo una serie de puntos de medida en las tribunas que se

colocan en la nave, el ábside, la girola y los balcones de la planta superior ya que el público se sitúa también en estas zonas durante la representación.

La figura 2 incluye los resultados de los parámetros promediados por frecuencias. El tiempo de reverberación medio para cada una de las situaciones es de 5,39 segundos para el culto y 4,87 segundos para la representación.

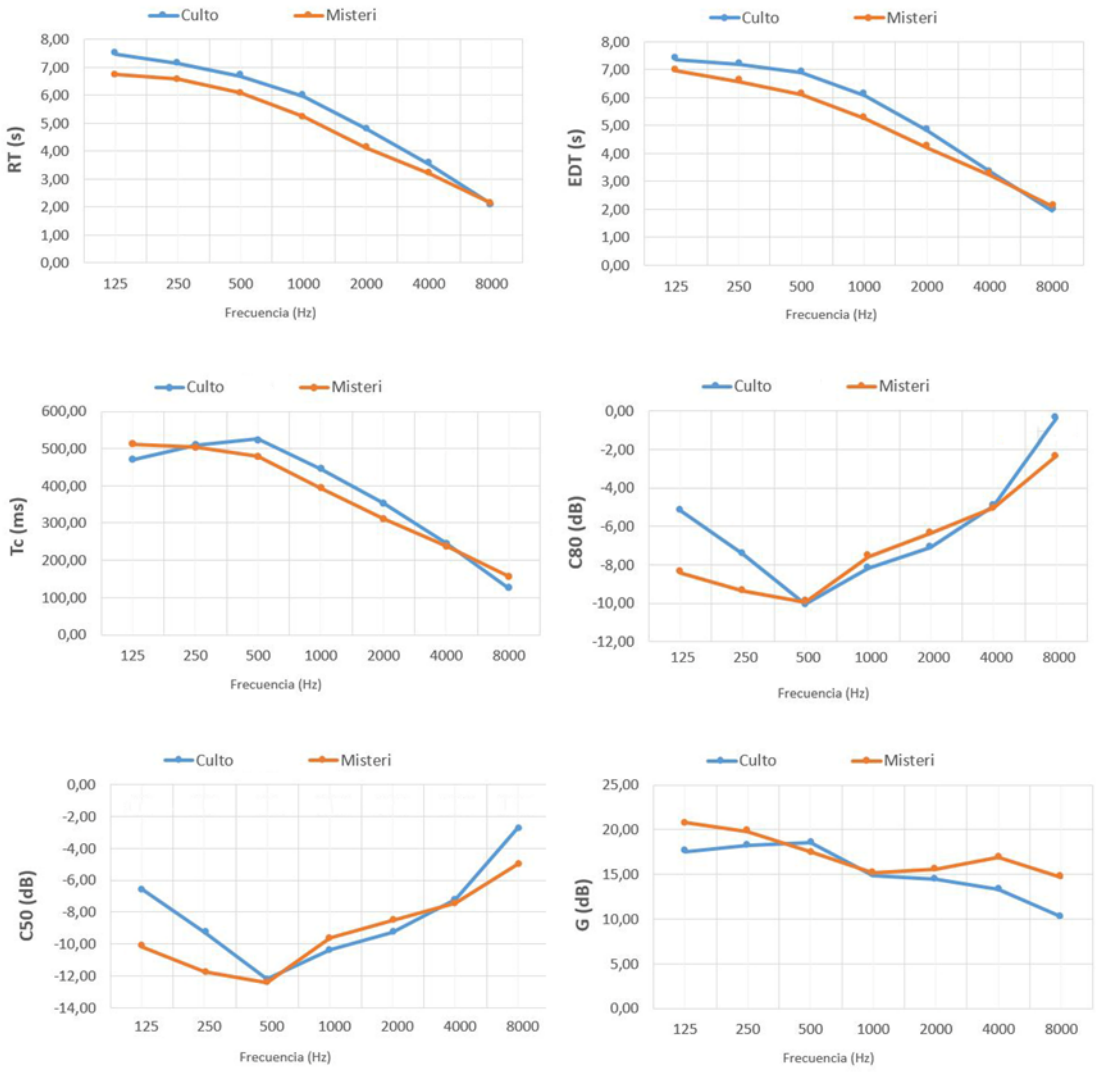



Figura 2. Resultados de las medidas.

Observamos que las modificaciones para la representación reducen la reverberación considerablemente (3 JNDs para 1000 Hz). Por otro lado se observan para las bajas frecuencias diferencias considerables para los parámetros C80 y C50. Por último, el parámetro G presenta diferencias notables tanto para las bajas frecuencias como para las altas manteniéndose constante para las frecuencias medias ($G_{mid}$ no varía).

## Medidas de absorción y simulación

Una vez establecidas las características geométricas de la sala, reflejadas en los distintos modelos, se han determinado los coeficientes de absorción de los materiales que la componen para asignarlos a cada una de las superficies. Dado que se trata de un edificio patrimonial cuyos materiales son singulares, difieren de los que suelen aparecer en catálogos, y pueden haber sufrido desgaste o variaciones por el paso del tiempo, se ha optado por llevar a cabo una medición in situ utilizando un aparato de la marca Microflown Technologies® formado por un micrófono y un sensor sensible a la velocidad de partícula y a la energía cinética de la onda sonora, por lo que permite medir la intensidad y la impedancia acústica. El protocolo de medida ha sido muy riguroso para evitar errores en los resultados [3].

Se han tomado medidas de los siguientes materiales: piedra de las paredes, mármol rojo del ábside, madera de los bancos y las puertas, madera y alfombra de las tribunas y cadafal del Misteri, vidrieras y pavimento de la planta superior. Para seleccionar los puntos de medida se ha realizado un reconocimiento de las superficies con cámara termográfica para determinar si existían heterogeneidades en los materiales ya que de haberlas provocarían variaciones en el coeficiente de absorción del mismo. Se han tomado tres medidas en cada punto para posteriormente tomar la media aritmética de las tres una vez comprobado que la desviación era inferior al 5%.

Para la simulación acústica se ha empleado el software Odeon. Se han realizado varias simulaciones modificando los valores de dispersión de los materiales con las distintas opciones que da el software, y los de absorción, realizando pruebas con los valores de catálogo y los medidos [4]. La opción que ha permitido obtener mejores resultados y se ha empleado posteriormente para la auralización ha consistido en asignar a las superficies los coeficientes de absorción medidos in situ. Con esta configuración se han obtenido valores casi idénticos a los medidos, para frecuencias medias, como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Comparativa de valores de T30 medidos y simulados.

| Frecuencia (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T30 Medido | 7,51 | 7,18 | 6,74 | 5,99 | 4,86 | 3,57 |
| T30 simulado | 5,73 | 5,57 | 6,73 | 6,02 | 5,29 | 3,21 |
| Diferencia | 1,78 | 1,61 | 0,01 | -0,03 | -0,43 | 0,36 |
| % | 23,66% | 22,46% | 0,15% | -0,46% | -8,80% | 10,17% |

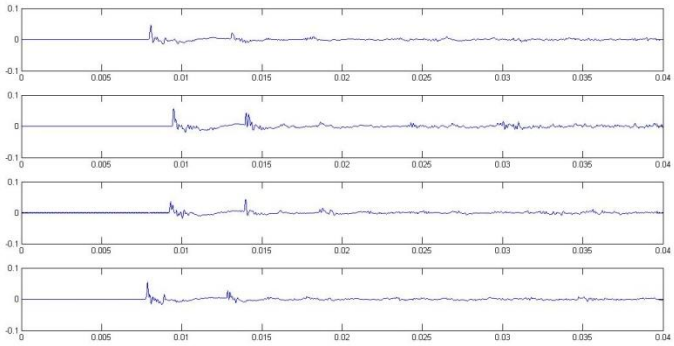
## Registro de la fuente cantada para obtener la señal dereverberada

Uno de los principales problemas para la obtención de auralizaciones en diferentes entornos es la obtención de grabaciones anecoicas (o equivalentes a las condiciones de campo libre) para poder realizar la convolución con las características acústico-energéticas en cada ubicación, a partir de la medida de la IR en cada punto del entorno a auralizar.

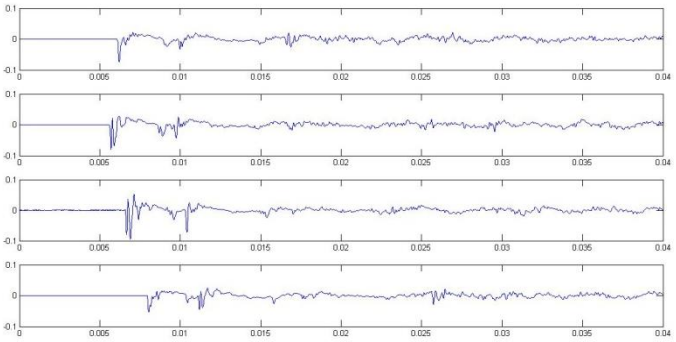
Para conseguir una grabación que nos permita lograr nuestro objetivo, se redujo el ruido de fondo y la reverberación. Las pruebas fueron realizadas en la sala de ensayo de los cantores y escolanía del Misteri, ubicada en la Casa de la Festa en Elx. Se trata de una sala de planta rectangular de 8x16,70 metros con techo plano y una altura libre de 2,60 metros. Las paredes son ciegas a excepción de las puertas de acceso a la misma y de dos grandes huecos resueltos con ladrillos de vidrio que le aportan iluminación en uno de sus lados cortos. Para evitar la influencia de los ventanales en el comportamiento acústico de la sala se cubrieron los mismos con una cortina acústica. Se construyó una retícula siguiendo el pavimento de la sala

de aproximadamente 55x55 cm para ubicar al cantor y conocer la distancia que los separaba de cada uno de los micrófonos. Se colocaron los ocho micrófonos normalizados, cuatro omnidireccionales y cuatro direccionales, en el centro de los lados y en las esquinas del cuadrado que circunscribía la retícula para rodear la fuente en la posición del cantor. Se realizaron grabaciones para una voy, dúo, tres voces, cuarteto y coro.

Para la obtención de la grabación anecoica de la canción monódica "Germanes mies" del Misteri d'Elx se ha registrado, en las condiciones explicadas a uno de los niños cantores de la Escolania. Por otra parte, con la sala vacía y fuente omnidireccional que se iba ubicando en los diferentes puntos de la cuadrícula, mediante una señal sweep se realizaron grabaciones con todos los micrófonos que nos permitirá obtener la IR de la sala. La grabación de un cantor se realizó registrando su localización y con los micrófonos en la misma situación. La figura 3 muestra las primeras reflexiones de las IRs registradas para cada uno de los micrófonos.



(a)



(b)

Figura 3. Respuestas impulsivas iniciales registradas en los micros cardioides (a) y omnidireccionales (b) con la fuente ubicada en la posición del cantor.

A partir de la respuesta impulsiva registrada en la localización del cantor por los ocho micrófonos, podemos diseñar un filtro inverso en dominio de la frecuencia (que corresponde a la función de transferencia) [5] del tipo que se muestra en la ecuación (1).

$$TF(f) = \frac{fft(IR_{ini})}{|fft(IR_{ini})|^2 + \delta} \qquad (1)$$

En esta ecuación, se ha introducido un factor de regularización, que toma un valor de $\delta=10^{-2}$ $Hz^2$ y que es independiente de la frecuencia, el cual permite hacer que el filtro inverso sea

estable. Además sólo hemos considerado la señal a invertir hasta primera reflexión de la IR, por lo que el filtro únicamente refleja el sonido directo. En este caso hemos considerado que era suficiente con usar el intervalo temporal [0, 0.02] s para considerar la primera reflexión en la respuesta impulsiva inicial ($IR_{ini}$).

Esto lo hemos hecho en cada uno de los micrófonos de manera que hemos obtenido la función de transferencia de la fuente a cada micrófono. Finalmente, el producto de estas funciones con la transformada de Fourier de la señal cantada registrada ha permitido obtener la señal anecoica de la canción. Esta es la que hemos utilizado para auralizar la señal en el entorno.

El resultado de estas operaciones se observa en la figura 4 para uno de los micrófonos cardioides frontales a la fuente y el correspondiente omnidireccional ubicados en la misma línea, donde se representa el espectro de la señal registrada original y la señal dereverberada aplicando el procedimiento explicado, después de aplicar un filtrado Wiener para reducir el ruido de fondo.

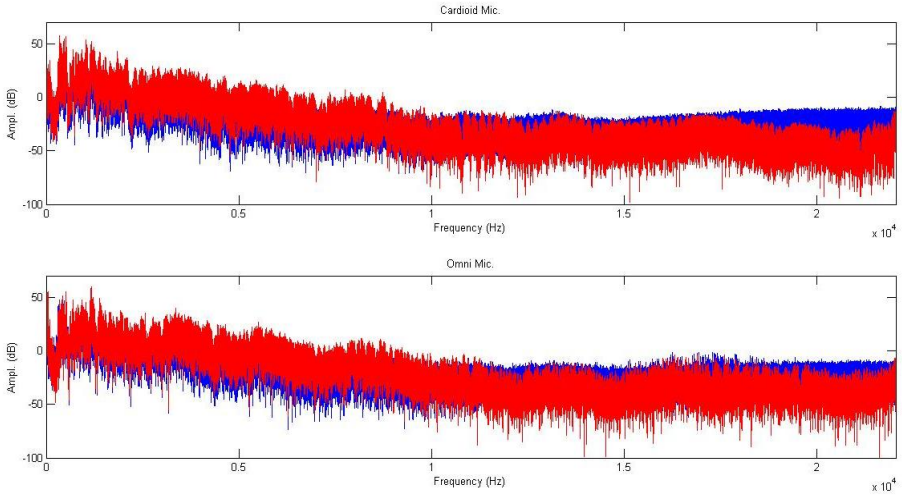



Figura 4. Espectro de la señal registradas original (en azul) y la dereverberada (en rojo) para uno de los micros cardioides y el micro omni frontales.

## Auralización de la fuente cantor en el entorno simulado

Una de las características más importantes de la simulación acústica es la posibilidad de obtener respuestas impulsivas de diferentes entornos y de esta manera obtener auralizaciones en estos. En nuestro caso, la simulación de la Basílica de Santa Maria de Elche nos ha permitido obtener las señales auralizadas a partir de las respuestas impulsivas del edificio sin los paramentos del “Misteri” y con ellos.

Cada 14 y 15 de agosto, la iglesia de Santa María de Elche es el escenario de uno de nuestros Patrimonios Inmateriales Sonoros más emblemáticos, la “Festa del Misteri d’Elx”, declarado Patrimonio Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO en 2001.

La pieza que hemos seleccionado para su auralización en este entorno, es la que hemos dereverberado anteriormente, titulada “Germanes mies” y que fue registrada en febrero de 2014. Esta pieza es cantada por un niño que representa a la Virgen María en el inicio del andador, que es una especie de corredor en forma de plano inclinado que conduce desde la puerta de la iglesia hasta el “cadafal” o escenario que está situado entre el crucero y el presbiterio.

Se ha tomado como referencia para esta auralización la grabación dereverberada del micrófono omnidireccional frontal (respecto a la posición del cantor), que se puede oír en [6]. En la simulación se ha obtenido la IR correspondiente ubicando la fuente cercana a la puerta principal del edificio en las dos condiciones que hemos explicado (con paramentos y sin paramentos). Los resultados los podemos oír en [7] y [8]

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha modelado el edificio de la Basílica de Santa María de Elche para la obtención de las características acústicas con paramentos y sin paramentos de la celebración del "Misteri d'Elx". Se han ajustado los modelos a partir de las medidas realizadas, tanto acústicas como de absorción. Como conclusión importante hemos obtenido que elmodelo con las medidas de la absorción in situ se ajusta perfectamente en RT para las frecuencias medias.

Por otra parte, se ha registrado el Misteri d'Elx, interpretado por la Capella del Misteri, formada por 55 cantores entre niños y adultos, en su local de ensayo. A partir de este registro, se ha seleccionado una de las piezas de solista para dereverberarla y auralizar el resultado en los modelos realizados. Las auralizaciones se han comparado subjetivamente con el registro original.

Este trabajo se va a extender con la dereverberación de los registros de piezas corales ubicando las diferentes fuentes separadas en sus posiciones originales dentro de la escena en el edificio.

Nuestro objetivo final es la virtualización tanto acústica como visual del Misteri completo, algo nunca realizado por la dificultad que conlleva, pero que permitiría a cualquier persona disfrutar de la representación sin necesidad de encontrarse físicamente en la basílica los días 13 y 15 de agosto,

## REFERENCIAS

[1] Montell, R., Giménez, A., Cerdá, S., Segura, J., Cibrián, R., Barba, A. Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia. Congreso Tecniacústica 2012.
[2] Sempere, J. La fiesta como tema y condición en Santa María de Elche. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia 1993.
[3] Pérez, C., Cerdá, S., Montell, R., Cibrián, R., Segura, J., Barba, A., Querol, L., Giménez, A. Metodología para medidas de absorción acústica in-situ mediante sensores de presión y velocidad. Congreso Tecniacústica 2013.
[4] García, F. Acústica arqueológica y auralización de un edificio patrimonial, Misteri D´ Elx - Basílica Santa María De Elche. Tesina de Máster. Universitat Politècncia de València 2013.
[5] Ina Kodrasi, Timo Gerkmann, Simon Doclo; "Frequency-domain single-channel inverse filtering for speech dereverberation: Theory and practice". IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014
[6] Registro dereverberado de "Germanes mies". URL: https://goo.gl/v0wO91
[7] Auralización en la posición original con la iglesia sin paramentos. URL: https://goo.gl/H00bMj
[8] Auralización en la posición original con la iglesia con paramentos. URL: https://goo.gl/Hffqob

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación BIA2012-36896. Agradecemos al Patronato Nacional del Misteri d'Elx, a los cantores y los responsables de la Basílica de Santa María su colaboración.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# SISTEMA DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE POTENCIA (UdP) BASADO EN SOFTWARE LABVIEW

PACS: 43.35.Yd

Roque R. Andrés; Alfonso Blanco; Enrique Riera; Víctor M. Acosta; Ignacio Martínez; Alberto Pinto; Ángel Guinot.

Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, roque.andres@csic.es

## ABSTRACT

It has been proved that the use of power ultrasounds (UdP) has brought many advantages in industrial processes. Due to the nature of UdP transducers and its working regime, it is crucial to have a control and characterization system with a high process capacity and high resolution.

The aim of this work is to introduce a new system that is able to perform simultaneous tasks like control, characterization, monitoring and analysis of UdP transducers, allowing also new Labview-based functionalities and a high versatility in the excitation system and in the result processing.

## RESUMEN

Numerosos procesos industriales se están viendo beneficiados por la aplicación ultrasonidos de potencia (UdP). Debido a la naturaleza de los transductores UdP y al modo de funcionamiento requerido, es fundamental disponer de un sistema de control y caracterización con alta capacidad de proceso, y elevada resolución.

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo sistema que efectúa simultáneamente tareas de control, caracterización, monitorización y análisis de transductores UdP, disponiendo de una serie de nuevas funcionalidades basadas en Labview, y permitiendo una alta versatilidad en el sistema de excitación y en la fase de procesado de los resultados.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la aplicación de ultrasonidos de potencia (UdP) de baja frecuencia (entre 20 y 50 kHz) está considerada como una nueva tecnología verde con un alto potencial para su aplicación industrial en diferentes procesos como transferencia de materia (extracción, deshidratación y secado de alimentos [1]), aglomeración de partículas [2], cirugía [3],

despumación, limpieza, etc… Entre los beneficios de esta tecnología se sitúan la disminución de la energía requerida para completar los procesos y la calidad de los productos resultantes.

La generación de UdP en medios multifásicos se consigue mediante transductores ultrasónicos formados por un vibrador tipo Langevin, consistente por un número determinado de cerámicas piezoeléctricas, una masa y una contramasa metálicas; un amplificador mecánico (horn) y un radiador de gran superficie, con un diseño circular, cuadrado, rectangular o cilíndrico [4-6].

Para generar el campo acústico de alta intensidad, necesario para producir los efectos deseados, es necesario aplicar altas tensiones eléctricas (de varios centenares de voltios) a las cerámicas piezoeléctricas, de forma que se originen grandes desplazamientos, en base el efecto piezoeléctrico, en el extremo del amplificador mecánico, que excite un modo de vibración adecuado en el radiador, que es el encargado de generar y transmitir este campo acústico de elevada intensidad.

Los requisitos anteriores pueden provocar que el transductor trabaje bajo un régimen no lineal, en el que pueden aparecer fenómenos como generación de armónicos, excitación autoparamétrica, respuestas multimodales, combinaciones de resonancias, modulaciones o histéresis, entre otros [7]. De todos estos efectos, el comportamiento histerético, así como los saltos en frecuencia (frequency drops) se producen en las cerámicas debido a sus pérdidas internas de carácter dieléctrico, elástico y piezoeléctrico, y que se manifiestan mediante un incremento de la temperatura en el stack de cerámicas cuando se aplican valores altos de tensión [8]. Por otro lado, la aparición de armónicos, la excitación autoparamétrica, las respuestas multimodales y la combinación de resonancias son efectos del sistema completo que aparecen al someterlo a altos niveles de potencia [9], y que pueden corregirse mediante modificaciones adecuadas en el diseño del transductor.

Por tanto, es necesario caracterizar cuidadosamente el comportamiento no lineal del transductor cuando se le somete a altos niveles de potencia. Se ha diseñado un sistema capaz de caracterizar este comportamiento no lineal del transductor y de trabajar en condiciones de resonancia con el objetivo de mejorar su eficiencia y de poder estabilizar la respuesta dinámica vibracional del sistema [10].

El objeto del presente trabajo es presentar algunas de las principales funcionalidades de este sistema a partir de la caracterización no lineal de un transductor UdP.

## SISTEMA EXPERIMENTAL DE MEDIDA

En la figura 1 se representa el esquema del sistema experimental de medida, y en la figura 2 una vista del sistema experimental desarrollado.

Cada uno de los elementos del nuevo sistema está gobernado por la aplicación informática desarrollada en el entorno Labview, y que permite no solo la caracterización no lineal de los transductores, sino que también puede llevar a cabo tareas de aprendizaje, control y protección en tiempo real de cada elemento, manteniendo las variables (tensión, corriente, potencia o temperatura) bajo unos valores máximos admisibles con objeto de evitar la aparición de fallos y grietas en el transductor ocasionados por fatiga a frecuencias ultrasónicas.

El principal objetivo de este sistema es poder llevar a cabo varias tareas de un modo simultáneo (adquisición, análisis, caracterización, control, monitorizado y registro de datos), ofreciendo una mayor efectividad, confort, versatilidad y reducción de errores gracias a la aplicación desarrollada mediante el software Labview, que también permite, entre otras cosas, modificar la configuración de medida sin realizar cambios físicos (conectar una inductancia ($L_0$) para compensar la capacidad paralelo ($C_0$) cuando se realice el seguimiento de resonancia.

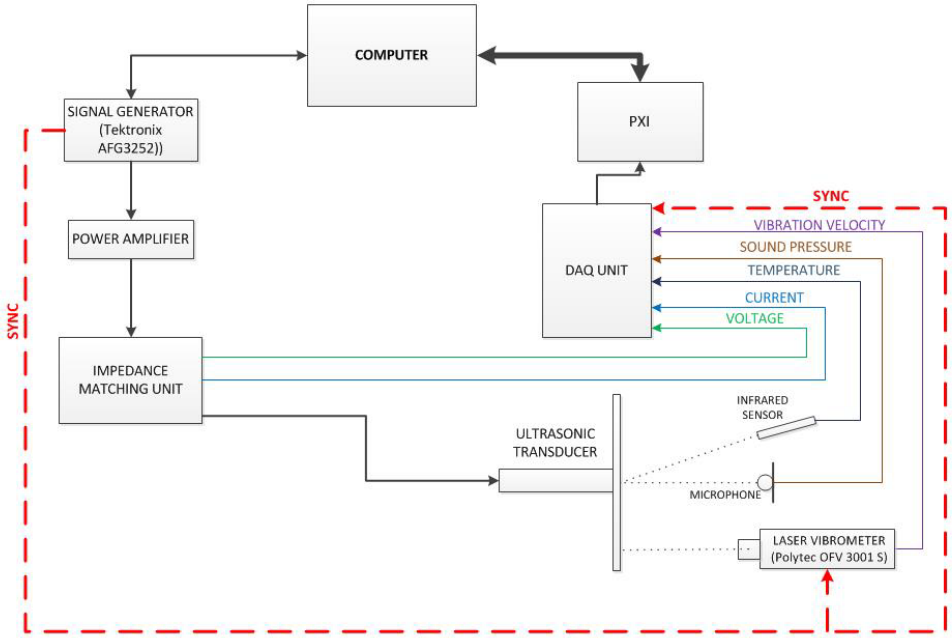



Figura 1. Diagrama de bloques del sistema experimental de medida.



Figura 2. Vista del sistema experimental de medida.

## CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES

Mediante este sistema se ha llevado a cabo la caracterización no lineal de diferentes tipos de transductores (tipo Langevin, transductor con placa rectangular y transductor con placa circular), prestando especial atención a algunas de las funcionalidades como la compensación virtual de la $C_0$ (capacidad interelectródica paralelo del stack de cerámicas); el seguimiento de la frecuencia de resonancia, o las curvas de interrelación de parámetros y variables. Conviene recordar que en una cerámica piezoeléctrica polarizada existe una relación entre sus propiedades mecánicas y eléctricas. Desde un punto de vista eléctrico, una cerámica delgada se comporta como un condensador plano, donde la capacidad, C, la carga Q, y el voltaje, V, están relacionados entre sí.



Figura 3. a) Transductor UdP con placa rectangular; b) Transductor UdP con placa circular.

**Seguimiento de Resonancia**

Para que un transductor ultrasónico UdP pueda conseguir los efectos deseados cuando trabaja a alta potencia (efectos como transferencia de masa, aglomeración, despumación, etc.), es necesario que durante el tiempo de operación esté vibrando en resonancia, en el modo de vibración adecuado.

Como consecuencia del calentamiento de las cerámicas piezoeléctricas, se produce un paulatino descenso de la frecuencia de resonancia del sistema ultrasónico, por lo que el sistema de excitación debe variar la frecuencia de acuerdo con estas variaciones. Este seguimiento de la resonancia se suele realizar con un oscilador ultrasónico externo.

Sin embargo, el nuevo sistema permite realizar el seguimiento por software, aplicando algoritmos tradicionales (búsqueda de máximos de potencia y mínimos de fase), de un modo simultáneo al monitorizado de todos los eventos.

**Compensación de la Capacidad Interelectródica Paralelo**

Para poder describir y analizar determinados tipos de sistemas se pueden utilizar las analogías electro-mecánicas, es decir su modelo mecánico o su circuito equivalente eléctrico simplificado en condiciones de resonancia.

En el caso de transductores piezoeléctricos, el sistema más simple está formado por un cuadripolo con dos puertas, una eléctrica y una mecánica. En la puerta eléctrica de entrada una fuente de voltaje hace fluir una corriente hacia el transductor. En la puerta mecánica de salida la fuerza aplicada hace vibrar al sistema con una velocidad de desplazamiento. La intensidad en la rama eléctrica está relacionada con la velocidad de desplazamiento en la rama mecánica.

La rama mecánica del transductor cuando trabaja en condiciones de resonancia es equivalente a un oscilador armónico con pérdidas compuesto por una masa ($M_m$), una compliancia mecánica ($C_m$) y una resistencia mecánica ($R_m$); o a un circuito eléctrico equivalente RLC, compuesto por una inductancia (L), una capacidad (C) y una resistencia eléctrica (R). Es decir, que la velocidad de desplazamiento de un oscilador mecánico sometido a una fuerza externa se comporta como una intensidad de corriente de un circuito serie RLC sometido a un voltaje externo con tal que: $M_m$, $C_m$ y $R_m$ sean análogos a L, C y R, respectivamente.

Por otro lado, y debido al comportamiento capacitivo de cerámicas piezoeléctricas, a este modelo equivalente RLC hay que añadir una capacidad interelectródica en paralelo ($C_0$), tal y como se muestra en la figura 4.

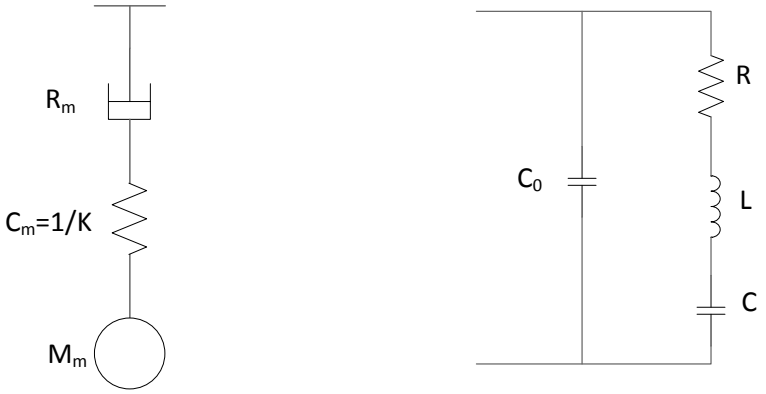



Figura 4. Analogía electromecánica; a) Circuito mecánico; b) Circuito eléctrico (al cual se le añade la capacidad en paralelo $C_0$).

En el circuito de la figura 4b, los elementos reactivos (C, L) almacenan energía que no es emitida al medio, únicamente se emite energía a través de la resistencia R cuyo valor viene dado por $R = R_P + R_R$. Es decir, la resistencia tiene dos partes: $R_P$ que representa la resistencia de pérdidas por fricción mecánica y $R_R$ que es la resistencia de radiación. La potencia disipada en $R_R$ es emitida al medio en forma de ondas ultrasónicas. Cuando transductor trabaja en resonancia, la capacidad C y la inductancia L de la rama mecánica se compensan y, por tanto, se anulan, por lo que ese circuito RLC se convierte en un sistema puramente resistivo. Sin embargo, la existencia de $C_0$, hace necesario intercalar una inductancia paralelo $L_0$ entre el transductor y el generador para obtener máxima transferencia de potencia, tal y como se muestra en la figura 5.

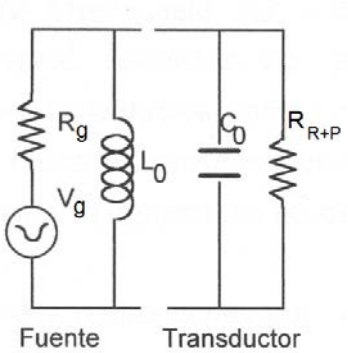



Figura 5 Circuito equivalente de un transductor en resonancia con adaptación al generador para máxima transferencia de energía

El nuevo sistema permite añadir esta inductancia ($L_0$) virtualmente para tareas de análisis de los resultados obtenidos, determinando el comportamiento del transductor cuando se aplican diferentes compensaciones. De esta manera se puede determinar cuál es la compensación más adecuada para cada configuración.

Se ha realizado el análisis de la compensación virtual para un transductor de placa rectangular compuesto por:

- Un stack con cuatro cerámicas piezoeléctricas tipo PZT 802.
- Amplificador mecánico (horn) de longitud igual a λ/2.
- Radiador extenso rectangular (308x570x33,5 mm), de duraluminio 7075.
- Frecuencia de resonancia alrededor de 21,5 kHz.
- Factor de calidad aproximado Q=15000 (ancho de banda de 1,2 Hz).

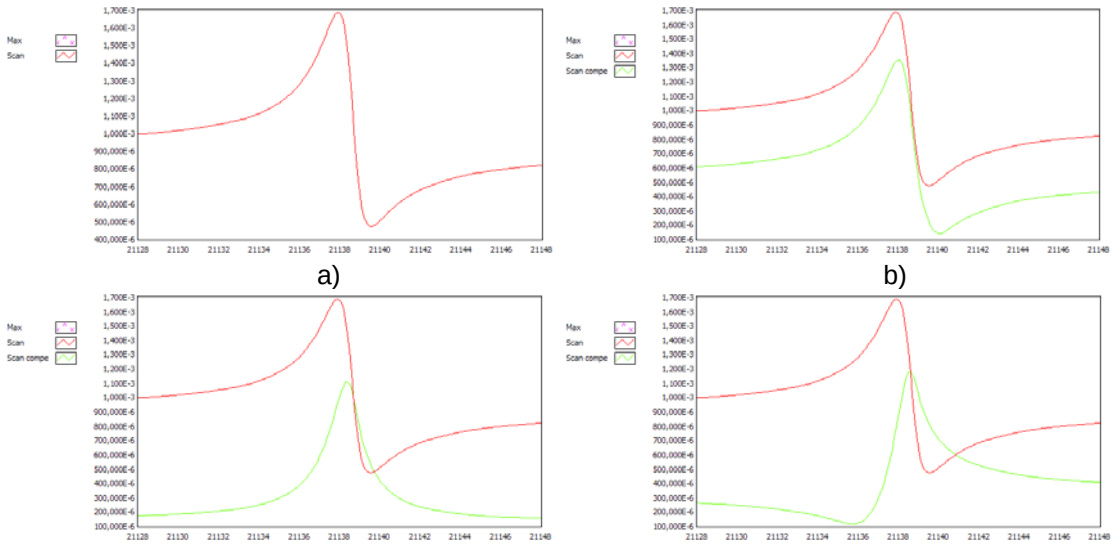



Figura 6. Medida de la admitancia y curva con la compensación virtual. a) Sin compensación; b) Compensación 3 nH; c) Compensación 6 nH; d) Compensación 9 nH.

De la figura anterior, se observa cómo diferentes valores de compensación arrojan diferentes resultados. Se puede deducir, por cuestiones de simetría, que la compensación más adecuada es 6 nH.

**Caracterización no lineal del transductor de placa rectangular**

En este apartado presentamos a modo de ejemplo la caracterización no lineal del transductor de placa rectangular plana con el objeto de determinar su comportamiento dinámico no lineal (hardening o softening).

Para ello se han realizado barridos 2D alrededor de la frecuencia de resonancia y para diferentes tensiones de excitación. En la figura 7 se muestran las velocidades de vibración $\dot{\xi}$ obtenidas con el vibrómetro láser apuntando, perpendicularmente, a un punto de la superficie del radiador en una zona de máximo desplazamiento, cerca del borde del radiador.

Se han considerado dos configuraciones diferentes, la primera con una señal de excitación continua y la segunda configuración con excitación tipo burst (o ráfagas), con el objeto de separar el comportamiento no lineal debido a efectos térmicos del comportamiento no lineal real debido al propio transductor.

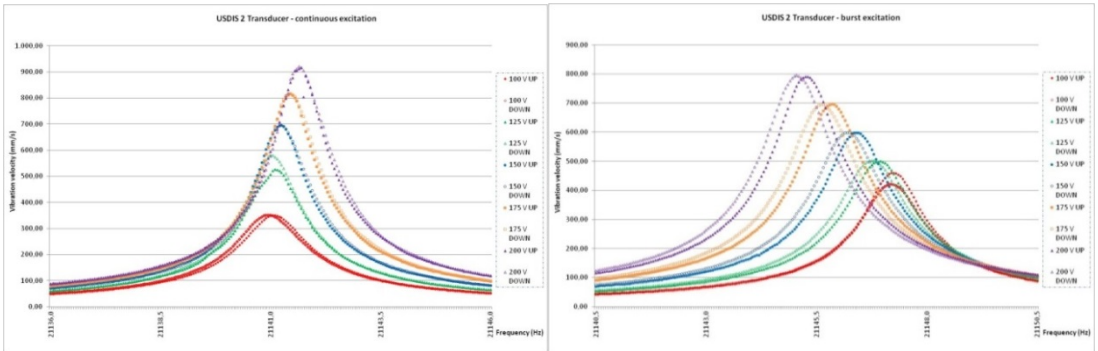



Figura 7. Influencia del tipo de excitación en la respuesta dinámica del transductor a través de la velocidad de desplazamiento a) Excitación continua; b) Excitación tipo burst.

En la figura anterior se muestra la influencia de la forma de excitación en la respuesta dinámica del transductor. La caracterización mediante señal continua muestra un ligero comportamiento tipo hardening -la frecuencia de resonancia aumenta al aumentar la tensión de excitación, aunque en este caso el incremento es inferior a 2 Hz en total. Sin embargo, la caracterización mediante señal tipo burst, minimizando los efectos térmicos, muestra un comportamiento tipo softening. De igual forma, se observa un comportamiento ligeramente histerético, ya aparece un desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia las bajas frecuencias en el barrido descendente.

**Interrelación de Parámetros y Variables.**

Tal y como se ha comentado anteriormente, el nuevo sistema permite evaluar las variaciones de las diferentes variables con otros parámetros o variables. En los transductores piezoeléctricos las variaciones de temperatura, por ejemplo, pueden afectar claramente a la eficiencia del sistema, provocando incluso la ruptura elemento radiante del transductor. Por tanto, disponer de una herramienta que automáticamente permita comparar dos variables, y que, incluso, obtenga el modelo analítico que las relacione, puede ser realmente útil para una caracterización más completa que englobe sistemas de protección.

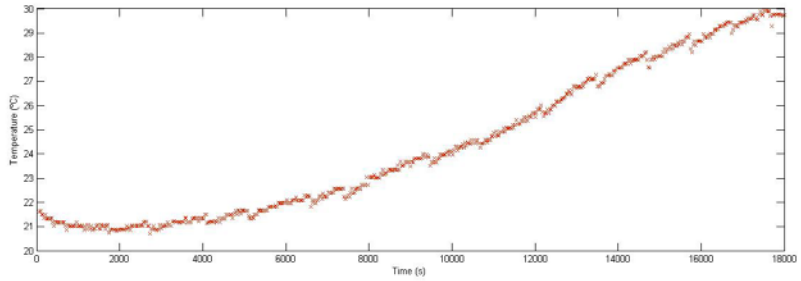



Figura 8. Evolución de la temperatura (ºC) con el tiempo (s).

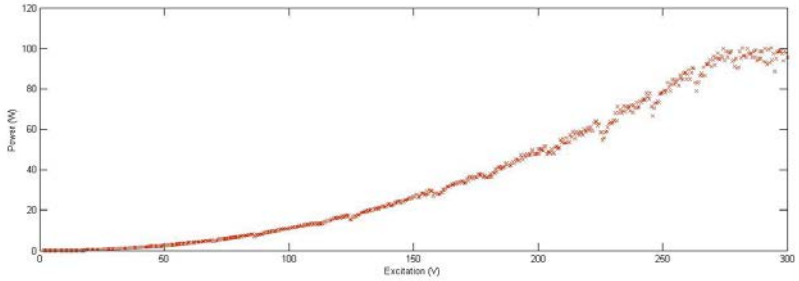



Figura 9. Variaciones de la potencia eléctrica (W) en función de tensión de excitación (V).

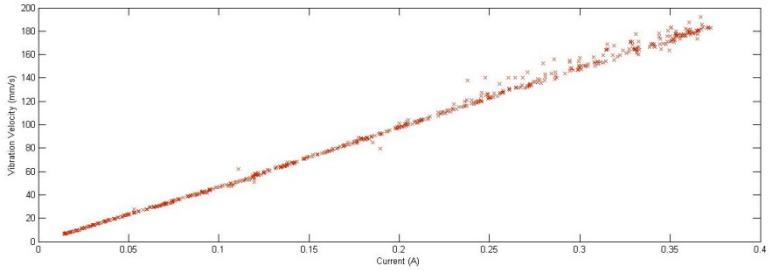



Figura 10. Evolución de la velocidad de vibración (mm/s) en función de la corriente (A).

Las figuras anteriores muestran, a modo de ejemplo, algunos resultados de relaciones entre parámetros y variables obtenidas experimentalmente. En el ejemplo, se muestra la evolución de la temperatura del transductor en función del tiempo (Figura 8), las variaciones de la

potencia eléctrica en función del voltaje (Figura 9) y la evolución de la velocidad de vibración con la corriente (figura 10). El experimento tuvo una duración de 350 minutos con una tensión inicial de 1 V y un incremento secuencial de 1 V cada minuto hasta alcanzar un valor máximo de 350V:

## CONCLUSIONES

Se ha presentado el nuevo sistema de control y caracterización de transductores ultrasónicos, que permite llevar a cabo varias tareas de un modo simultáneo, y que presenta avances respecto de otros sistemas anteriores, como el seguimiento de resonancia vía software, la compensación virtual de la capacidad $C_0$, o la posibilidad de obtener modelos analíticos que permitan relacionar diferentes variables fundamentales para el adecuado funcionamiento de los transductores UdP, como potencia, temperatura, velocidad de vibración, etc.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MINECO la financiación de este trabajo de investigación realizado en el marco del proyecto DPI 2012-37466-C03-01 (USDIS).

## BIBLIOGRAFÍA

[1] J.V. Garcia-Perez, J.A. Carcel, E. Riera, C. Rosselló, A. Mulet, Intensification of Low-Temperature Drying by Using Ultrasound, Drying Technology, 30 (2012) 1199-1208.
[2] E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodríguez, J.A. Gallego-Juárez, 34 - Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications, in: J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff (Eds.) Power Ultrasonics, Woodhead Publishing, Oxford, 2015, pp. 1023-1058.
[3] M. Lucas, A. Mathieson, Ultrasonic cutting for surgical applications, (2015).
[4] J.V. García-Pérez, J.A. Cárcel, E. Riera, A. Mulet, Influence of the Applied Acoustic Energy on the Drying of Carrots and Lemon Peel, Drying Technology, 27 (2009) 281-287.
[5] S. de la Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V.M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, J.A. Gallego-Juárez, Food drying process by power ultrasound, Ultrasonics, 44, Supplement (2006) e523-e527.
[6] V.M. Acosta Aparicio, E. Andrés Gallego, J.A. Gallego Juárez, E. Riera, G. Rodríguez Corral, Application of high-power ultrasound for drying vegetables, in: Forum Acusticum, Sociedad Española de Acústica, Sevilla, 2002.
[7] A. Cardoni, E. Riera, J.A. Gallego Juárez, Nonlinear response in airborne piezoelectric transducer for power ultrasonics, in: 2013 International Congress on Ultrasonics, Singapore, 2013, pp. 173-178.
[8] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, Effects of Vibration Stress and Temperature on the Characteristics of Piezoelectric Ceramics under High Vibration Amplitude Levels Measured by Electrical Transient Responses, Japanese Journal of Applied Physics, 38 (1999) 5581.
[9] J.A. Gallego-Juárez, E. Riera, V.M. Acosta-Aparicio, Modal Interactions in High-Power Ultrasonic Processing Transducers, AIP Conference Proceedings, 1022 (2008) 595-604.
[10] R.R. Andrés, A. Blanco, V. Acosta, E. Riera, I. Martínez, A. Pinto, New Ultrasonic Controller and Characterization System for Low Temperature Drying Process Intensification, Physics Procedia (in press), (2015).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

6º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# PROPAGACIÓN NO LINEAL DE ULTRASONIDOS EN LÍQUIDOS CON BURBUJAS: SIMULACIONES MEDIANTE UN MODELO POR ELEMENTOS FINITOS

PACS: 43.25.Yw

Tejedor Sastre, María Teresa[1]; Leblanc, Alexandre[2]; Lavie, Antoine[2]; Vanhille, Christian[1]
[1]Universidad Rey Juan Carlos
Tulipán s/n
28933, Móstoles, Madrid
España;
Tel: 916647482,
Fax: 914887338
E-Mail: mariateresa.tejedor@urjc.es, christian.vanhille@urjc.es
[2]Université d'Artois
Technoparc Futura
62400, Béthune
Francia

**ABSTRACT**

The objective of this work is to study the nonlinear propagation of ultrasound in a liquid with a homogenous density of gas bubbles. A new multidimensional numerical model based on the finite element method has been developed. The simulations allow us to analyze the pressure field and the bubble vibrations in several cases. The authors acknowledge the support of the Ministry of Economy and Competitiveness of Spain (DPI2012-34613, BES-2013-064399).

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es estudiar la propagación no lineal de ultrasonidos en un líquido con densidad homogénea de burbujas de gas. Se ha desarrollado un nuevo modelo numérico multidimensional basado en el método de los elementos finitos. Las simulaciones permiten analizar el campo de presiones y la vibración de las burbujas en varias configuraciones. Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad de España (DPI2012-34613, BES-2013-064399).

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de ultrasonidos de alta intensidad es cada vez más frecuente. Existe un gran abanico de aplicaciones, entre ellas la industria alimentaria [1], la industria química [2], la filtración de partículas [3] y la medicina [4]. La propagación de ultrasonidos en medios no lineales constituye una rama de investigación teórica y aplicada muy actual. Uno de los medios que más interés despierta son los líquidos con burbujas ya que son medios extremadamente no lineales con aplicaciones en la industria [2] y la medicina [5]. La presencia de burbujas en el líquido modifica drásticamente las propiedades acústicas del medio, y por tanto la propagación del campo acústico [6,7].

Resulta de gran interés tener herramientas que simulen la propagación ultrasónica en este tipo de medios. Algunos desarrollos han sido llevados a cabo como [8,9] donde se resuelve en tres dimensiones la ecuación de ondas lineal teniendo en cuenta una distribución gaussiana del tamaño de la burbuja pero sin tener en cuenta la interacción campo-burbuja. En [10] se analiza la ecuación de ondas lineal teniendo en cuenta la disipación de las burbujas. En [11] se analiza como el campo acústico en un resonador se acopla con la vibración de las paredes, teniendo en cuenta las burbujas para analizar la atenuación del campo.

La propagación de ultrasonidos de alta intensidad en medios no lineales produce fenómenos de gran interés que se deben tener en cuenta en los modelos numéricos de simulación. Un ejemplo en un fluido homogéneo se encuentra en [12], donde en una dimensión se tiene en cuenta la no linealidad en un tubo lleno de un gas ideal. En [13] se resuelve la ecuación de ondas unidimensional en un líquido con burbujas teniendo en cuenta la no linealidad, la dispersión y la disipación mediante el método de las diferencias finitas. El estudio en dos y tres dimensiones se lleva a cabo en [14,15].

En este trabajo presentamos un nuevo estudio basado en el método de los elementos finitos donde se analiza la propagación ultrasónica en tres dimensiones en un líquido con densidad constante de burbujas de gas. Para ello se resuelve un sistema diferencial que acopla la presión acústica con las variaciones de volumen experimentadas por las burbujas de gas.

## 2. MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

Se considera un transductor esférico de radio de curvatura $R_c$ y de diámetro de abertura D emitiendo en un líquido con burbujas formado por agua y burbujas de aire. Se considera que el dominio espacial de estudio tiene simetría axial y longitud $L_{max}$. Se resuelve el sistema diferencial que acopla la presión acústica $p(z,r,t)$ con la variación de volumen $v(z,r,t) = V(z,r,t) - v_{0g}$ experimentada por las burbujas con respecto a su volumen inicial $v_{0g}$, r y z son las coordenadas espaciales (cilíndricas) y t la coordenada temporal. Este sistema viene descrito por la ecuación de ondas, Eq. 1, y por la ecuación de Rayleigh-Plesset, Eq. 2:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c_{0l}^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_{0l} N_g \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\ ;\ (z,r) \in ]0,\ L_{max}[x]0,D/2[,\ t \in ]0,t_{max}[ \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \omega_{0g}\delta\frac{\partial v}{\partial t} + \omega_{0g}^2 v = av^2 + b\left(2v\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2\right) - \eta p;\quad (z,r) \in [0,\ L_{max}]x[0,D/2],\ t \in ]0,t_{max}[ \qquad (2)$$

donde $c_{0l}$ es la velocidad del sonido en el líquido, $\rho_{0l}$ es la densidad del líquido, $N_g$ es la densidad de burbujas, $t_{max}$ es el tiempo total que dura el experimento, $\omega_{0g} = \sqrt{3\gamma_g p_{0g} / \rho_{0g} R_{0g}^2}$ es la frecuencia de resonancia de las burbujas, $R_{0g}$ su radio inicial, $p_{0g} = \rho_{0g} c_{0g}^2 / \gamma_g$ es la presión atmosférica del gas, $\gamma_g$ la razón de los coeficientes específicos del gas, $\rho_{0g}$ la densidad del gas en el equilibrio, $c_{0g}$ la velocidad del sonido en el gas, $\delta = 4\nu_l / (\omega_{0g} R_{0g}^2)$ es el coeficiente de viscosidad del medio, donde $\nu_l$ es la viscosidad cinemática del líquido, $a = (\gamma_g + 1)\omega_{0g}^2 / 2v_{0g}$, $b = 1/(6v_{0g})$ y $\eta = 4\pi R_{0g} / \rho_{0l}$ son contantes. Se usan las siguientes condiciones iniciales:

$$p(z \neq 0) = v = \frac{\partial p}{\partial t}(z \neq 0) = \frac{\partial v}{\partial t} = 0;\ t = 0,\ (z,r) \in [0,\ L_{max}]x[0,D/2] \qquad (3)$$

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$\frac{\partial p}{\partial r}(r=0)=0;\ z\in[0,\ L_{max}],\ t\in[0,t_{max}] \qquad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}(z=L_{max})=-\frac{1}{c_{0l}}\frac{\partial p}{\partial t}(z=L_{max});\ r\in[0,D/2],\ t\in]0,t_{max}] \qquad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r}(r=D/2)=-\frac{1}{c_{0l}}\frac{\partial p}{\partial t}(r=D/2);\ z\in[0,\ L_{max}],\ t\in]0,t_{max}] \qquad (6)$$

$$p(z=0,t)=p_0\sin(\omega_f t);\ r\in[0,D/2],\ t\in[0,t_{max}] \qquad (7)$$

Se usa como fuente de excitación una fuente continua de presión de amplitud $p_0$ y frecuencia f.

## 3. RESULTADOS

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales acopladas se usa el método de los elementos finitos [16,17]. En este caso se usa el software Comsol-multiphysics [18] para implementar este método de resolución.

Se usan los siguientes parámetros: $D=0{,}04\ m$, $L_{max}=0{,}092\ m$, $R_c=0{,}08\ m$, $t_{max}=22T$, siendo $T=1/f$, $f=300\ kHz$, $R_{0g}=4{,}5*10^{-6}m$, $N_g=10^{11}\ m^{-3}$, $c_{0g}=340\ m/s$, $c_{0l}=1500\ m/s$, $\rho_{0g}=1{,}29\ kg/m^3$, $\rho_{0l}=1000\ kg/m^3$, $\gamma_g=1{,}4$ y $\nu_l=1{,}43\times10^{-6}\ m^2/s$.

- **Régimen lineal: $p_0$ = 10 Pa**

Se resuelve el problema para el caso lineal tomando como amplitud de la fuente $p_0=10\ Pa$. En la Fig. 1 se muestra la evolución del campo de presión a lo largo del tiempo de estudio.

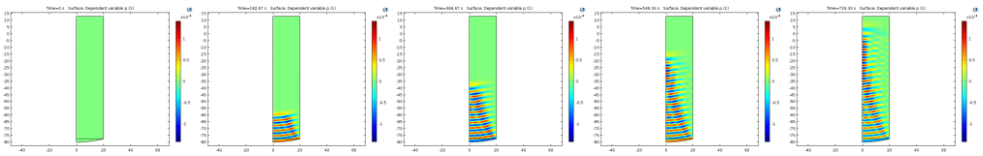


Fig. 1. Evolución de la presión en régimen lineal durante 22T.

- **Régimen no lineal $p_0$ =25.000 Pa**

Se resuelve el problema para el caso no lineal tomando como amplitud de la fuente $p_0=25.000\ Pa$. En la Fig. 2 se muestra la evolución del campo de presión a lo largo del tiempo de estudio.

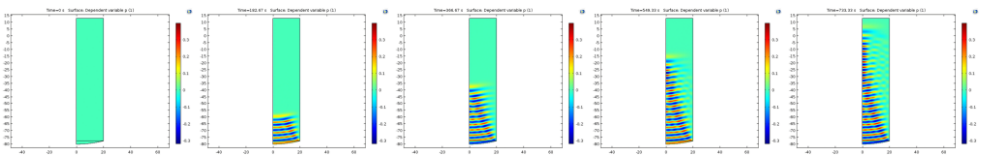


Fig. 2. Evolución de la presión en régimen no lineal durante 22T.

A la vista de las Figs. 1 y 2 se puede observar cómo tanto en régimen lineal como no lineal el sistema focaliza, concentra su energía en un punto del eje. Cuando se trabaja en régimen no lineal se observa que la onda focaliza más cerca de la fuente.

En la Fig. 3 se muestra la posición de los puntos en el eje donde se analiza la señal no lineal en tiempo (Fig. 4) y frecuencia (Fig. 5). En la Fig. 4 se muestra la forma de onda para los últimos periodos mientras que en la Fig. 5 muestra la descomposición en frecuencia de la señal.

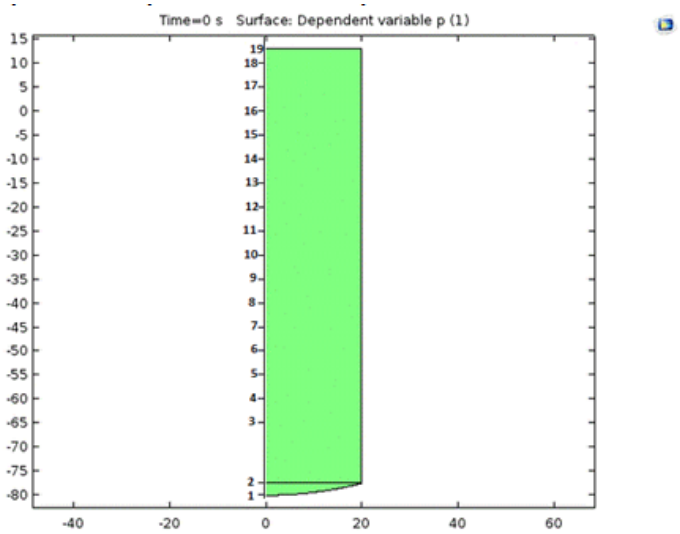



Fig. 3. Esquema del sistema con los puntos donde se analiza la señal.

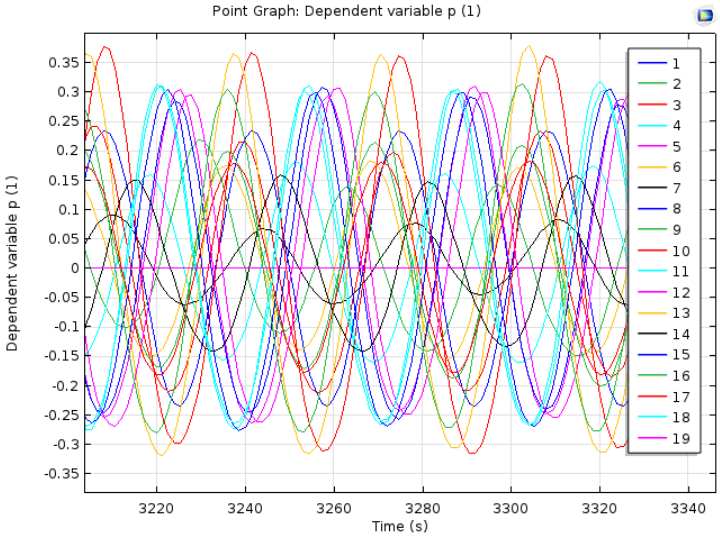



Fig. 4. Forma de onda en los distintos puntos del sistema.

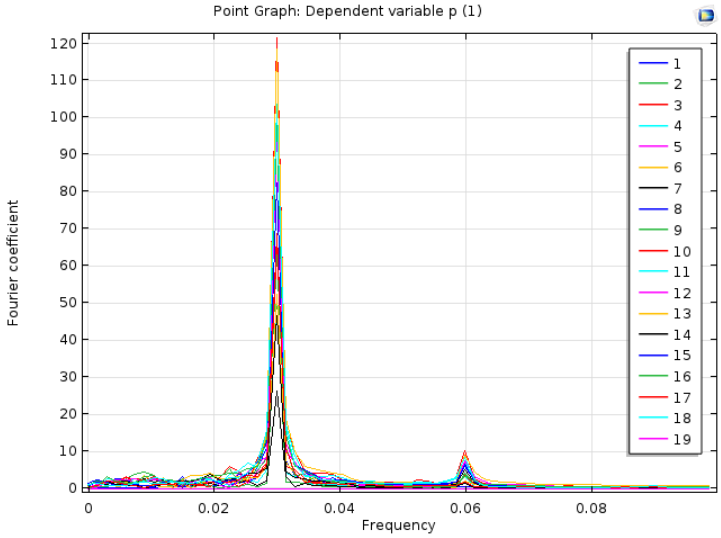



Fig. 5. Descomposición en frecuencia en los diferentes puntos del sistema.

La Fig. 4 permite observar las diferentes amplitudes obtenidas en los diferentes puntos. El punto donde la intensidad es mayor es el punto 10 que se corresponde con una distancia de 50 mm de la fuente. En la Fig. 5 se observa la presencia de un segundo armónico en algunos puntos. Su máximo se presenta de nuevo en el punto número 10.

## REFERENCIAS

1 Chemat, F.,Huma, Z. and Kamran Khan, M. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction, *Ultrason. Sonochem*. **18**, 813-835, (2011).
2 Mason, T. J. and Lorimer, J. P. *Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing*, Wiley-VCH, Weinheim, (2002).
3 Riera Franco de Sarabia, E., Gallego Juárez, J. A., Rodríguez Corral, G., Elvira Segura, L. and González Gómez, I. Application of high-power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes, *Ultrasonics* **38**,642-646, (2000)
4 Al-Bataineh, O.,Jürgen,J. and Huber, P. Clinical and future applications of high intensity focused ultrasound in cancer, *Cancer treat. Rev.* **38**, 346-353, (2012).
5 J. Wu, W.L. Nyborg (Eds.), Emerging therapeutic ultrasound, World Scientific (2006).
6 Young, F. R. *Cavitation*, McGraw-Hill, London, (1989).
7 Hamilton, M. F. and Blackstock, D. T. (Eds.) *Nonlinear Acoustics*, Academic Press, San Diego, (1998).
8 Dähnke, S., Swamy, K. M. and Keil, F.J. Modeling of three-dimensional pressure fields in sonochemical reactors with an inhogeneous density distribution of cavitation bubbles. Comparison of theorical and experimental results, *Ultrason. Sonochem*. **6**, 31-41, (1999).
9 Dähnke, S., Swamy, K. M. and Keil, F.J. A comparative study on the modelling of sound pressure field distributions in a sonoreactor with experimental investigation, *Ultrason. Sonochem*. **6**, 221-226, (1999).
10 Nomura, S. and Nakagawa, M. Analysis of an ultrasonic fiend attenuated by oscillating cavitation bubbles, *Acous. Sci. Technol*. **22**, 283-291, (2001).
11 Yasui,K., Kozuka,T.,Tuziuti, T., Towata, A., Iida, Y.,King, J: and Macey, P. FEM calculation of an acoustic field in a sonchemical reactor, *Ultrason. Sonochem*. **14**, 605-614, (2007).

12 Vanhille, C.,Campos-Pozuelo,C. and Conde, C. A Composed Numerical Model Applied to High Amplitude Ultrasonic Resonators, *Acta Acust. United Acust*. **90**, 376-379, (2004).
13 Vanhille, C. and Campos-Pozuelo, C. Numerical simulation of nonlinear ultrasonic standing waves in bubbly liquids, *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **10 (6)**,751-757, (2009)
14 Vanhille, C. and Campos-Pozuelo, C. Nonlinear ultrasonic standing waves: Two-dimensional simulatons in bubbly liquids, *Ultrason. Sonochem*. **18**, 679-982, (2011).
15 Vanhille, C. and Campos-Pozuelo, C. Numerical simulations of three-dimensional nonlinear acoustic waves in bubbly liquids, *Ultrason. Sonochem*. **20**, 963-969, (2013).
16 Vanhille, C., Lavie, A. and Campos-Pozuelo, C*. Modélisation numérique en mécanique: introduction et mise en pratique*, Hermes Science Publications - Lavoisier, Paris, (2007).
17 Buchanan,G.R. *Finite elements analysis*, Schaum's outline series ,McGraw-Hill, New York (1995).
18 COMSOL, http://www.comsol.com.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CHARACTERIZATION OF THE CHANGES OF THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF DIFFERENT AEROSOLS DURING AN ACOUSTIC AGGLOMERATION PROCESS

PACS: 43.35.Zc.

Aleixandre, Manuel[1]; Riera, Enrique[1]; Delgado, Rosario[2]; Herranz, Luis E.[2]; Acosta, Victor M.[1]; Pinto, Alberto[1]; Martínez, Ignacio[1]; Gallego-Juárez, Juan A.[1]

[1]Dpto. Sensores y Tecnologías Ultrasónicas (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, manuel.aleixandre@csic.es
[2]Unidad de Seguridad Nuclear, División de Fisión Nuclear, CIEMAT, Avda. Complutense, 22, E28040-Madrid, España

## ABSTRACT

In this work the acoustic agglomeration process of well characterized $SiO_2$ aerosols was examined. The aerosols used were composed by different particle sizes: $SiO_2$ spheres of 0.3 µm, 1 µm and 2.5 µm diameters with different concentrations. An ultrasonic standing wave field with an average sound pressure level of about 155 dB at 21 kHz was generated inside a parallepipedic chamber. The particle size distributions were measured with an aerodynamic particle sizer at the outlet of the chamber in the range 0.5 to 20 µm and the agglomeration effect was characterized. The aerodynamic mass median diameter was increased up to 30% and the particle concentration was reduced up to 90%.

## RESUMEN

En este trabajo se examina el proceso de Aglomeración Acústica de Aerosoles de $SiO_2$ bien caracterizados. Los aerosoles se componían de partículas esféricas de $SiO_2$ de distintos tamaños: 0.3 µm, 1 µm y 2.5 µm y presentes en diferentes concentraciones. Un campo acústico estacionario con un nivel de presión acústica promedio de 155 dB a 21 kHz se generó en el interior de una cámara paralelepipédica. La distribución de tamaños de partículas fue medida con un Aerodynamic Particle Sizer (APS) a la salida de la cámara en el rango de 0.5 µm a 20 µm caracterizando así la aglomeración. El diámetro mediano aerodinámico en masa se incrementó en un 30% y la concentración numérica se redujo en un 90%.

## INTRODUCTION

Power ultrasounds have a very broad field of application that is thoroughly revised in [1]. In material processing power ultrasounds allows wielding of metals or plastics [2] and also 3D printing [3]. In the food industry power ultrasounds have application in drying processes at lower temperatures [4], foam control [5] or emulsification [6]. It has applications also in other fields such as fabrication of nanomaterials or nanostructures [7]. Another application is the Aerosol Acoustic Agglomeration (AAA) [8]. AAA is a process in which an acoustic field induces in the aerosol particles a relative motion that leads to collisions and so to agglomeration. The particle relative movement is caused by different mechanisms that are detailed described in several works [9-12]. These mechanisms can be classified according to its linearity of the wave-particle interaction. Among the linear effects are the entrainment of the particle with the sound field and the linear interaction of the particles with the obstacle scattered sound waves. Among the nonlinear effects are the momentum transference of the sound waves (primary and scattered ones) so-called radiation force and the hydrodynamic effect produced by the wake effect that consists in the flow caused by moving particles and the effect on other nearby particles. The main application of the AAA is the reduction of the very small particles, below 0.3 μm, because the size increase facilitates the aerosol deposition, filtering, or retention [8][13]. From the early works on the applications of the AAA [14] the improvement on the efficiency of the ultrasonic plate-transducers [15] has allowed its application to industrial processes in coal and diesel power plants [16]. This work, founded by the EU-PASSAM project (Grant agreement No. 323217 – Euratom 7FP)[17], extends the evaluation of AAA to the nuclear aerosols produced during severe nuclear accident venting [18][19].

### EXPERIMENTAL DESIGN

The experimental design is aimed to replicate as close as possible the expected conditions during hypothetical an accident venting of a nuclear reactor [18]. In which the particles of interest have an aerodynamic diameter around 1 μm as the ones found in the Chernobyl and Fukushima accidents [20][21]. For this purpose an experimental facility has been designed and constructed, which is schematized in figure 1. This installation is composed of two parts, a system of aerosol generation and characterization (PECA) and a Mitigative System - Acoustic Agglomerator MSAA.

The MSAA system consists on a rectangular section chamber that contains the acoustic field and is circulated by the aerosol. Placed inside there are two power ultrasonic transducers, each one have a stepped circular radiator driven at its center by an ultrasonic piezoelectric vibrator and connected to a power electronics generator. The transducers generate a 21 kHz stationary acoustic field inside the chamber with an average sound pressure level of 155 dB. This system was placed inside the PECA. The PECA is a configurable installation that makes air circulate controlling the flow and monitoring the temperature, humidity and pressure.

PECA also generates the aerosol using a brush system PALAS RGB 100-ph able to achieve a maximum aerosol concentration inside the MSAA chamber of 200 $mg/m^3$. For the characterization of the aerosols several instrument have been used at the inlet and the outlet of the MSAA. At the inlet, just after the aerosol generator, is installed an Electronic Low Pressure Impactor (ELPI) of DEKATI and a probe to an absolute membrane filter. At the outlet an Aerodynamic Particle Size (APS) of TSI and the same kind of membrane filter as the inlet have been switched on the same outlet probe. Again the disposition can be seen in figure 1. The aerosols did consist on mixtures of $SiO_2$ particles of different sizes and in one experiment $SiO_2$ mixed with $TiO_2$. The particles were mono disperse $SiO_2$ particles 0.3 μm, 1 μm and 2.5 μm in

diameter and polydisperse 1 μm agglomerated $TiO_2$ particles with primary particles sized between 0.01 μm and 0.05 μm.

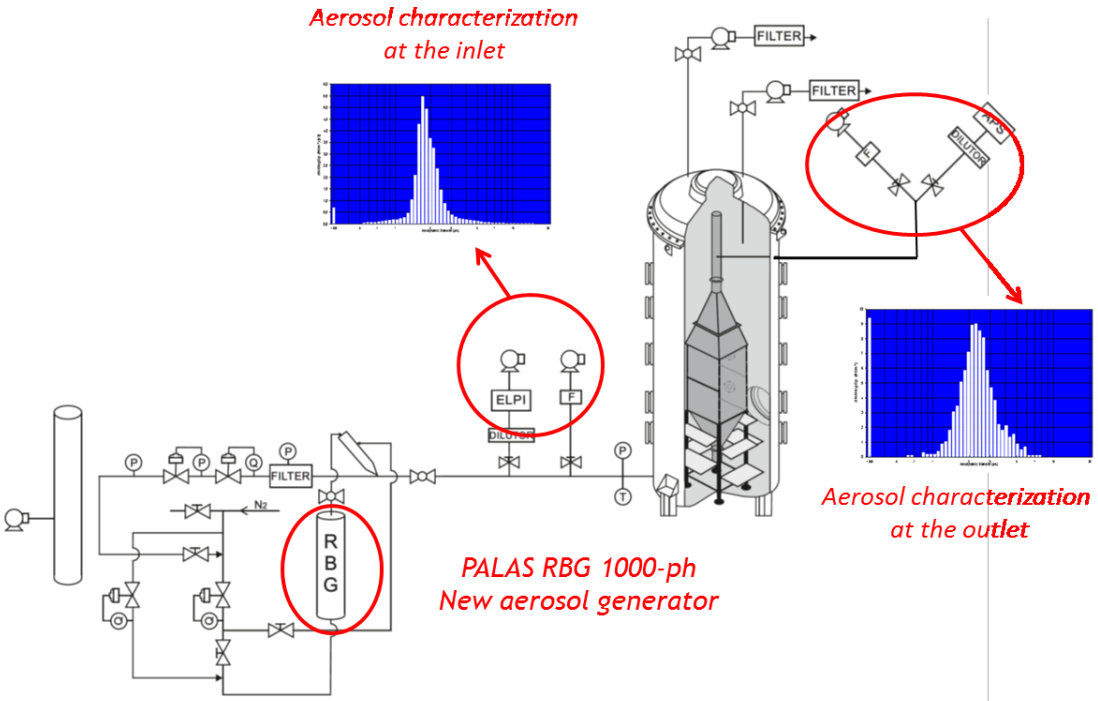



Figure 1. Scheme of the experimental system of PECA-MSAA

## MEASUREMENTS

### Experimental Matrix

The measurements were carried out during the months January to May of 2015 in the Madrid CIEMAT installations. During this time ten experiments were done with different experimental conditions summarized in Table 1. Each experiment had different aerosol carrier air flow and different composition of the aerosol. In the AAA1 and AAA2 experiments the aerosol was composed by monodisperse aerosols of 1 μm at different flows. Since aerosol generator released the particles at the same mass/time rate an increase in the flow meant a decrease in the aerosol mass concentration. Also higher flow meant less time of the aerosol in the acoustic field. The effect of the time of residence and concentration has been also studied for poly-disperse aerosols with particles of 1 μm and 0.3 μm. The AAA1, AAA3, AAA4 and AAA7 experiments aim to see the effect of the balance of $SiO_2$ particles in mass on aerosol under the same total concentration and time of residence conditions. The AAA8 and AAA9 experiments study the influence of bigger particles (2.5 μm) in the agglomeration and lastly the AAA10 experiment study the influence of very poly-disperse $TiO_2$ aerosol.

### Measurement Process

The Table 2 shows the schematics of the process that has been followed in each experiment. In the first sub-phase the system is stabilized during approximately 10 minutes while the input aerosol particle size distribution is measured by the ELPI. In the next sub-phase the membrane filters are connected and recollect aerosol particles at the inlet and the outlet for 7 minutes. After

this sub-phase, the filters are removed and the APS start the measurements. The APS keeps measuring till the end of the whole phase. Finally, in the "flush" sub-phase the flow is suddenly increased to 200 kg/h and the particle generation is shutdown. The next phase follows the same steps but the ultrasound system is activated from the start till the start to the flush phase. These two phases were called F1 and F2. Finally the experiment is repeated with the same phases (F1' and F2') but in the APS measurement sub-phase the ultrasound generation is switched on and off in 2 minutes intervals.

Table 1. Experimental variables of the experimental matrix

| Name | Flow (kg/h) | Residence time (s) | Input Total Mass Concentration ($mg/m^3$) | Mass proportion of $SiO_2$ 0.3 µm (%) | Mass proportion of $SiO_2$ 1 µm (%) | Mass proportion of $SiO_2$ 2.5 µm (%) | Mass proportion of $TiO_2$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **AAA2** | 100 | 10 | 25 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| **AAA6** | 100 | 10 | 25 | 75 | 25 | 0 | 0 |
| **AAA5** | 50 | 20 | 50 | 75 | 25 | 0 | 0 |
| **AAA4** | 12.5 | 80 | 200 | 75 | 25 | 0 | 0 |
| **AAA1** | 12.5 | 80 | 200 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| **AAA3** | 12.5 | 80 | 200 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| **AAA7** | 12.5 | 80 | 200 | 90 | 10 | 0 | 0 |
| **AAA8** | 12.5 | 80 | 200 | 0 | 75 | 25 | 0 |
| **AAA9** | 12.5 | 80 | 200 | 50 | 30 | 20 | 0 |
| **AAA10** | 12.5 | 80 | 200 | 50 | 30 | 0 | 20 |

Table 2. Scheme of the measurement Process

| Experiment | | F1 (Reference Phase) | | | | F2 (Ultrasound phase) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Stabilization Sub-phase | Membrane Filter Sub-phase | APS measurement sub-phase | Flush sub-phase | Stabilization Sub-phase | Membrane Filter Sub-phase | APS measurement sub-phase | Flush sub-phase |
| Duration (minutes) | | 10 | 7 | 5 | 2 | 10 | 7 | 5 | 2 |
| Inlet | **Aerosol Generation** | | | | | | | | |
| | **ELPI measurement** | | | | | | | | |
| | Membrane Filter | | | | | | | | |
| **Ultrasounds** | | | | | | | | | |
| Outlet | **Membrane Filter** | | | | | | | | |
| | **APS Measurement** | | | | | | | | |

## Instrumentation

One membrane filters have placed at the inlet and other at the in the outlet. These filters collect the aerosol particles that pass through them. With the weight changes in the filters and the PECA data of the flow that passes through the membrane during the 7 minutes the inlet and outlet aerosol concentration has been calculated. Comparing the inlet and outlet concentration we can quantify the retention of the system with and without ultrasounds. The ELPI have measured continuously during the each phase the inlet aerosol particle size distribution and it allows us to measure the aerosol generation and normalize the aerosol output distribution. The Figure 2 illustrates the ELPI measurement of the F2' of the experiment AAA10 with the times of the different sub-phases marked in blocs of different colors. Finally the APS measured the outlet

aerosol size distribution during the "APS measurement" sub-phase and "flush" sub-phase. The measurement of F2' of experiment AAA10 can be seen in Figure 3 where the ultrasonic system has been switched off and on. The ultrasonic system started on and then was switched off three times producing a rise in the number of particles each time.

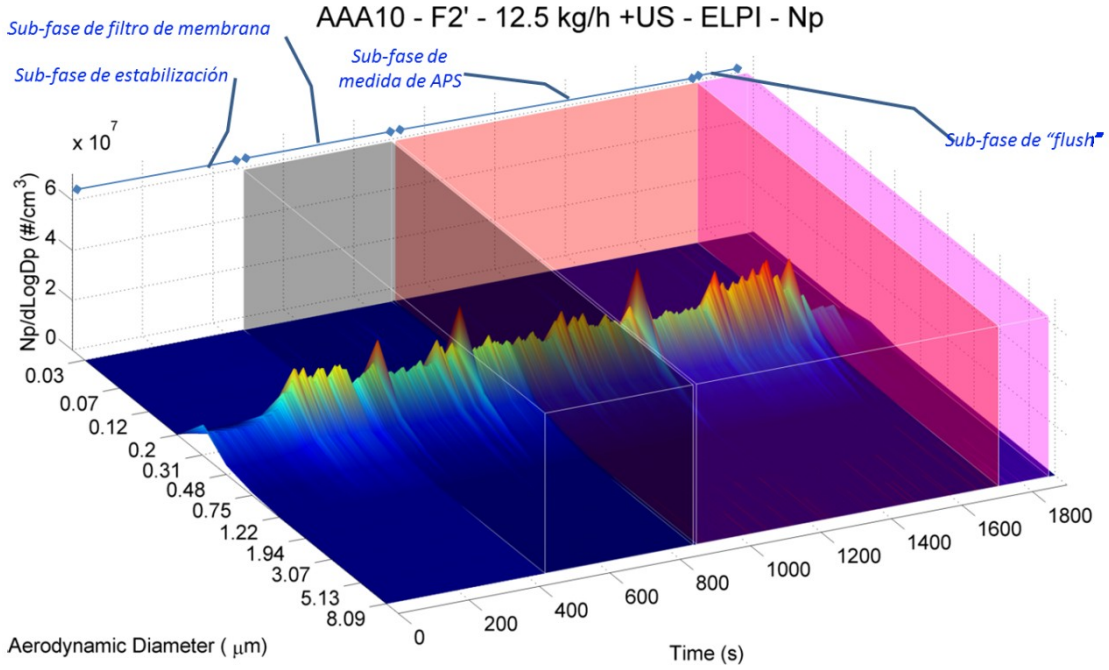



Figure 2. ELPI measurement of F2' phase of experiment AAA10. The different color blocs correspond to the different sub-phases.

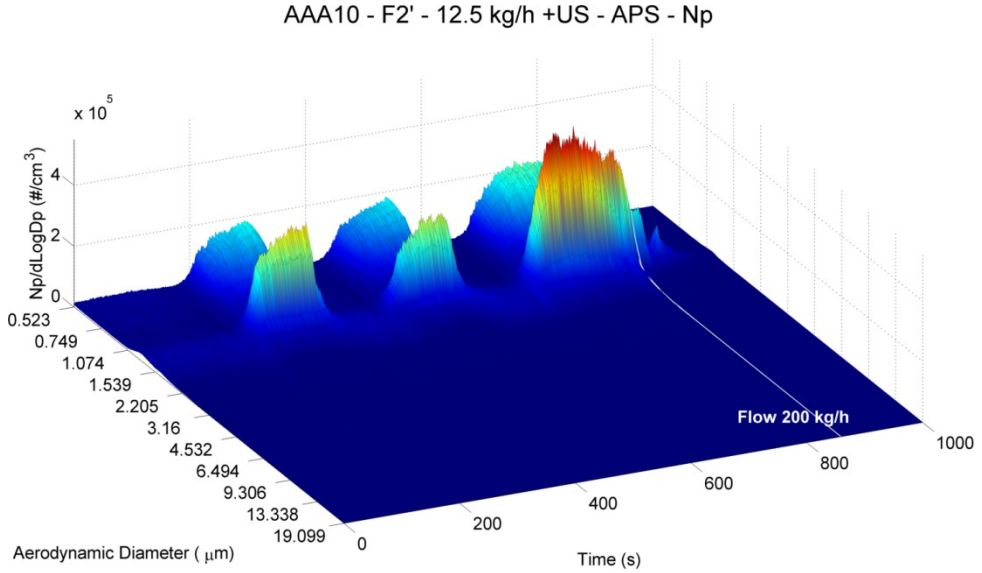



Figure 3. APS measurement of F2' phase of experiment AAA10. The white line represents the time at in which the sub-phase "flush" starts.

**DISCUSION**

The reduction of number concentration or reduction of mass concentration has been calculated by several methods. The results of the reduction calculated by the membrane filters are shown

in Table 3. The membrane filters show that for high flows there is no significant increase of retention associated with the application of the ultrasound field and that the retention increases with the reduction of the flow. The effect also increases as the ratio of 1 µm particles increases respect of the 0.3 µm particles going from nearly a 0% of increase retention to a 77% when the proportion gets to 50%. The reduction has been calculated also from the APS measurement data. For this the concentration has been normalized by the ELPI concentration measurement, only the common size range between 0.523 µm and 9.86 µm has been used. The reduction coefficients have been calculated using the equations 1 and 2 where $Np_b$ and $M_b$ are the relative number concentration and mass concentration respectively, the subscripts ELPI and APS refers to the measurements made by those instruments, and $RC_n$ y $RC_m$ are the number and mass reduction coefficients calculated with the average of 3 minutes of the "APS measure" sub-phase.

$$Np_b = \frac{Np_{APS}}{Np_{ELPI}} \qquad M_b = \frac{M_{APS}}{M_{ELPI}} \tag{1}$$

$$CR_n = \frac{media\ (Np_{b\ con\ US})}{media\ \ (Np_{b\ sin\ US})} \qquad CR_m = \frac{media\ (M_{b\ con\ US})}{media\ (M_{b\ sin\ US})} \tag{2}$$

The results are also summarized in Table 3. The effects goes up to 89% for $RC_M$ and up to 91% para $RC_{Np}$ showing an increase on the retention with the increase of the total concentration and time of residence (due to the lower flow). Also there was an increase of the retention with the increase of the poly-dispersion when balancing the mass proportion of the particles of the aerosol in the experiments AAA1, AAA3, AAA4 and AAA7.

Table 3. Mass and number reduction coefficients, increase of retention measured by membrane filters, Median size and GSD changes measured by the APS

| | **Reduction coeficients** | | **Membrane Filters** | **Size and GSD Changes** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Name** | $RC_M$ (%) | $RC_{Np}$ (%) | Relative Increase of mass retention ratio (%) | Δ Median % | Δ GSD % | Δ Median % | Δ GSD % | Δ Median % | Δ GSD % |
| ***AAA1*** | *60* | *56* | *-67.16* | | | *-12.2* | *-9.5* | | |
| ***AAA2*** | *12* | *15* | *~0* | | | *-1.8* | *-0.3* | | |
| ***AAA3*** | *86* | *91* | *-76.60* | *1.5* | *5.8* | *28.0* | *16.4* | | |
| ***AAA4*** | *84* | *87* | *-61.21* | *0.5* | *-0.3* | *34.6* | *12.7* | | |
| ***AAA5*** | *18* | *25* | *-30.80* | *8.4* | *6.4* | *3.4* | *4.2* | | |
| ***AAA6*** | *26* | *29* | *~0* | *-4.2* | *-3.0* | *-1.0* | *0.6* | | |
| ***AAA7*** | *55* | *67* | *~0* | *18.6* | *3.7* | *27.9* | *14.2* | | |
| ***AAA8*** | *55* | *45* | *-43.52* | | | *-4.2* | *-4.2* | *-0.4* | *-67.7* |
| ***AAA9*** | *87* | *83* | *-63.96* | *4.8* | *2.0* | *23.3* | *15.3* | *4.6* | *-87.3* |
| ***AAA10*** | *77* | *90* | *-73.02* | *-100.0* | *-100.0* | *37.0* | *15.3* | | |

To characterize the measured distributions at the outlet we adjust by minimum squares a sum of lognormal distributions to the 3 minute average APS measured distributions. The Figure 4 shows such adjustments for the experiment AAA4, the crosses are the averaged distribution, the dotted lines each lognormal and the thick line the sum of the lognormal distributions. The median diameter and the geometric standard deviation (GSD) of each particle type were calculated by the lognormal distribution associated to that particle size. The increases of the median diameter and the GSD are calculated by equation 3 in which $U^+$ and $U^-$ the phases are with and without ultrasounds and X is the magnitude of the increment. The increase of the two couple of phases (F1-F2 and F1'-F2') is averaged presented in Table 3.

$$\Delta X = \frac{X_{U+} - X_{U-}}{X_{U-}} \tag{3}$$

The median diameter and the GSD of the 0.3 µm particles do not show change in size because the agglomeration mainly happens among different size particles and not among particles with the same size but the seen effect is the lowering of the particle concentration. The particles of 1 µm do show an increase up to 24% in median size that represent the agglomeration that is higher when the flow is lower.

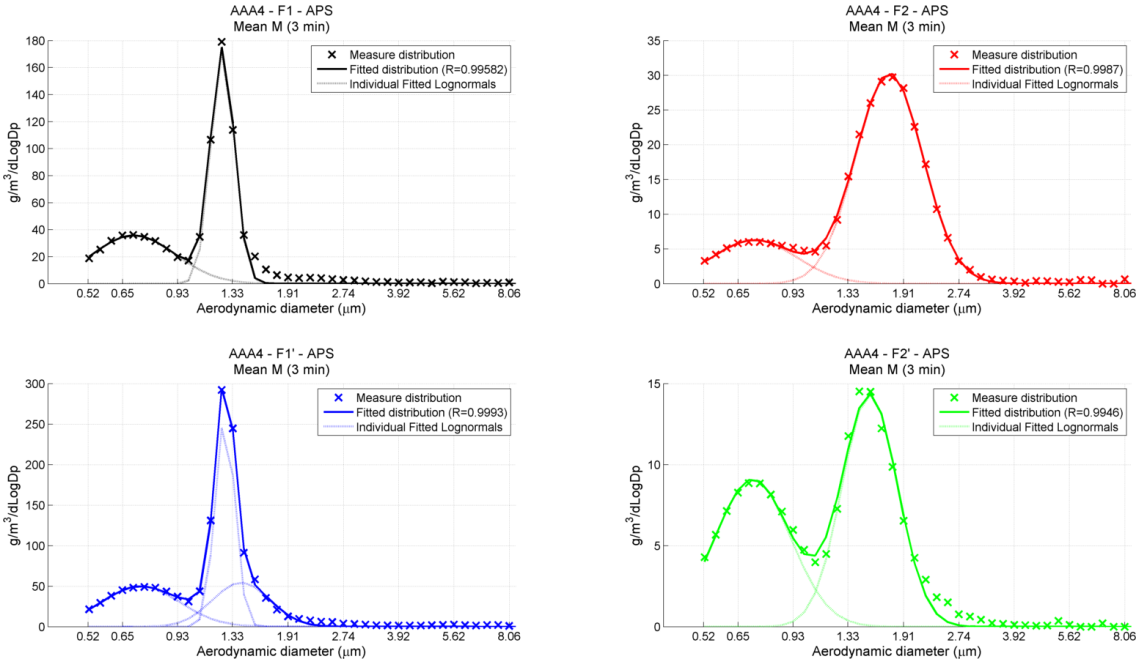



Figure 4. Setting of the distributions for AAA 4 experiments

## CONCLUSIÓN

The effects that a standing ultrasonic field at 21 kHz and 155 dB has over several aerosols of around 100 mg/m$^3$ have been studied. The effect measured by means of an APS is a mass retention increase up to 87% and an increase of the median diameter up to 37%. These effects increase with the polydispersion of the aerosol and with its concentration. In future works this effects will be compared with the effects predicted by the different AAA models.

## AKNOWLEGDEMENTS

This work has been founded by the EU-PASSAM project (Grant agreement No. 323217 – Euratom 7FP)

## REFERENCES

[1] J. A Gallego-Juárez and K. F. Graff, *Power Ultrasonics, Applications of High-Intensity Ultrasound*, ISBN: 978-1-78242-028-6
[2] E. Kicukov, A. Gursel, *Ultrasonic welding of dissimilar materials: A review*, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol. 3 No. 1 (2015), pp 28-36, ISSN 2303-4521
[3] J. O. Obielodan, A. Ceylan, L.E. Murr, B. E. Stucker, *Multi-material bonding in ultrasonic consolidation*. Rapid Prototyping Journal, 16(3), 2010, 180-188.

[4] J.V. Santacatalina, M. Contreras, S. Simal, J.A. Cárcel, J.V. Garcia-Perez, *Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 28, January 2016, Pages 100-109, ISSN 1350-4177.
[5] G. Rodríguez, E. Riera, J. A. Gallego-Juárez, V. M. Acosta, A. Pinto, I. Martínez, A. Blanco, *Experimental study of defoaming by air-borne power ultrasonic technology*, Physics Procedia, Volume 3, Issue 1, 1 January 2010, Pages 135-139
[6] M. T. Hamed Mosavian, A. Hassani, *Making Oil-in-Water Emulsions by Ultrasound and Stability Evaluation Using Taguchi Method*, Journal of Dispersion Science and Technology Volume 31, Issue 3, 2010, Pages 293-298
[7] D. G. Shchukin, D. Radziuk, and H. Möhwald, *Ultrasonic Fabrication of Metallic Nanomaterials and Nanoalloys*, Annual Review of Materials Research, Vol. 40: 345-362
[8] D. Zhou, Z. Luo, M. Fang, H. Xu, J. Jiang, Y. Ning, Z. Shi, *Preliminary Experimental Study of Acoustic Agglomeration of Coal-fired Fine Particles*, Procedia Engineering, Volume 102, 2015, Pages 1261-1270
[9] E.P. Mednikov, *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*, New York, Consultants Bureau, 1965
[10] N.L. Shirokova, *Aerosol coagulation*, in Rozenberg LD, Volume 2, Physical Principles of Ultrasonic Technology, New York, Plenum Press, 1973, 475-539
[11] S. Temkin, *Gas dynamic agglomeration of aerosols. I. Acoustic waves*, Phys Fluids, 6, 1994 2294-2303
[12] D.T. Shaw, *Acoustic agglomeration of aerosols, Recent developments in aerosol science*, New York, John Wiley and Sons, 1978, 279-319
[13] E. Riera, J.A. Gallego-Juárez, L. Herranz, G. Rodríguez, V. M. Acosta, A. Blanco, A. Pinto, I. Martínez, R. R. Andrés, *Aplicación de los transductores ultrasónicos de placa en procesos de aglomeración de partículas en el marco del proyecto europeo PASSAM* Conferencia invitada. Tecniacústica, 29-31 Oct. 2014, Murcia. Publicación oficial del Congreso, 1396-1405
[14] H. W. Denser, E. Neumann, *Industrial sonic agglomeration and collection systems*. Industrial & Engineering Chemistry, 41(11), 1949, 2439-2442.
[15] J.A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez-Corral, L. Gaete-Garreton, *An ultrasonic transducer for high power applications in gases*, Ultrasonics, Volume 16, Issue 6, 1978, Pages 267-271, ISSN 0041-624X
[16] J. A. Gallego-Juárez, E. Riera-Franco De Sarabia, G. RodrÍguez-Corral, T. L. Hoffmann, J. C. Gálvez-Moraleda, J. J. Rodríguez-Maroto, F. J. Gómez-Moreno, A. Bahillo-Ruiz, M. MartÍn-Espigares, M. Acha, *Application of Acoustic Agglomeration to Reduce Fine Particle Emissions from Coal Combustion Plants* Environmental Science & Technology 1999 33 (21), 3843-3849
[17] T. Albiol, L. Herranz, E. Riera, S. Guieu, T. Lind, G. Manzini,A. Auvinen, N. Losch, New studies on passive and active systems towards enhanced severe accident source term mitigation - The PASSAM Project, Eurosafe, Toward Convergence of Technical Nuclear safety Particles in Europe.
http://193.174.114.174/userfiles/file/Eurosafe2012/Seminar%201/Abstracts/01_10-New%20studies%20PASSAM.pdf
[18] H.-J. Allelein, A. Auvinen, J. Ball, S. Güntay, L. Enrique Herranz, A. Hidaka, A. V. Jones, M. Kissane, D. Powers, G. Weber, *State-Of-The-Art Report On Nuclear Aerosols*, Nuclear Energy Agency Committee On The Safety Of Nuclear Installations, NEA/CSNI/R(2009)5
[19] D. T. Shaw, N. Rajendran, Application of Acoustic Agglomerators for Emergency Use in Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Plants, Nuclear Science and Engineering / Volume 70 / Number 2 / May 1979 / Pages 127-134
[20] E. I. Kauppinen, R. E. Hillamo , S. H. Aaltonen and K. S. Sinkko, *Radioactivity Size Distributions of Ambient Aerosols in Helsinki, Finland, during May 1986 after the Chernobyl Accident: Preliminary Report*, Environ.cl. Technol. 1986, 20, 1257-1259
[21] H. Malá, P. Rulík, V. Bečková, J. Mihalík, M. Slezáková, *Particle size distribution of radioactive aerosols after the Fukushima and the Chernobyl accidents*, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 126, December 2013, Pages 92-98

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# IMAGEN ARFI MULTIFOCAL

PACS 43.60.-c;

González-Salido, Nuria; Camacho Sosa, Jorge;
Grupo de Sensores y Sistemas Ultrasónicos. Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI Torres Quevedo). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (CSIC)
Serrano 144. C.P.: 28006, Madrid. España. Tfno.: 91 561 88 06.
Email: nuria.g.s.@csic.es

## ABSTRACT

ARFI imaging is based on measuring the tissue displacement generated by a focused ultrasound beam, and hence, it is valid in a small region around the focal point. To increase imaging range, a multi-focus ARFI imaging technique combines several images obtained with several foci located at different depths. This work analyzes the displacement variability sources in multi-focal-zone ARFI imaging and proposes a procedure to normalize and combine single-focus images based on a priori known parameters: system focal configuration and global tissue sound velocity and attenuation coefficient. Performance of the proposed algorithm is evaluated by simulation and by experimentation with tissue mimicking phantoms, achieving satisfactory results.

## RESUMEN

ARFI es una modalidad de imagen elastográfica que emplea la fuerza de radiación de haces focalizados para provocar desplazamientos muy localizados en el interior del tejido. Para ampliar el rango de la imagen se pueden combinar los desplazamientos generados a distintas profundidades, pero se requiere de algún procedimiento de normalización de los datos. Este trabajo propone un algoritmo para normalizar y combinar las imágenes individuales, que es independiente de los desplazamientos medidos y se basa únicamente en la configuración focal y en parámetros globales del tejido (atenuación y velocidad).

## INTRODUCCIÓN

Acoustic Radiation Force Impulse Imaging ARFI) es una técnica de imagen elastográfica por ultrasonidos basada en el uso de la fuerza de radiación [1]. Esta fuerza, generada por la propagación de haces focalizados en medios atenuantes produce deformaciones del tejido, que en el caso de medio elásticos, isotrópicos y localmente homogéneos, son directamente proporcionales a la elasticidad del tejido. Midiendo estas deformaciones, ARFI provee

imágenes cualitativas que proporcionan una medida indirecta de la elasticidad, permitiendo distinguir regiones con distinta dureza

La región de excitación (ROE) de la fuerza coincide con el área focal, determinada por la configuración del haz. Para incrementar el ROE, se pueden combinar los desplazamientos de varias imágenes parciales de un solo foco (SFI) usando 3-4 zonas focales separadas 3-4mm [2-5]. Como la fuerza generada depende de la posición del foco y varía con la profundidad, para obtener la imagen final es necesario realizar una serie de correcciones que incluyen normalizar cada imagen parcial por su máximo valor en el foco y eliminar la dependencia con la profundidad. Además, se deben corregir las transiciones entre las SFI para evitar efectos visuales de bandas en la imagen final.

En trabajos previos [2-5] se han combinado varias SFI de un phantom de elasticidad homogénea, obteniendo los coeficientes de normalización directamente de los datos medidos. Esta metodología puede producir errores cuando la elasticidad del medio no es homogénea, como ocurre con los tejidos, y puede reducir el contraste de una lesión. Para evitar estos errores, este trabajo propone un método basado en datos conocidos a priori, como la configuración focal del sistema, y variables globales del tejido como la atenuación y la velocidad del sonido, que pueden ser medidas con otras técnicas.

## MÉTODO

La fuerza de radiación empleada en ARFI se produce por la transmisión del momento del haz al tejido y puede estimarse a partir de la eq.1 [6-8]

$$F = \frac{2\alpha I}{c} \quad (1)$$

donde $\alpha$ es la atenuación del tejido, I la intensidad del haz y c la velocidad del sonido. Como la elasticidad es proporcional a dicha fuerza, un mapa cualitativo de la elasticidad puede obtenerse midiendo directamente los desplazamientos. La imagen SFI se genera línea por línea emitiendo en primer lugar un pulso de corta duración con el tejido en reposo. A continuación se emite un pulso focalizado de larga duración (entre 100 y 500 us) que genera desplazamientos, del orden de µm, en la dirección del haz. Finalmente se vuelve a emitir un pulso de corta duración y se registra la señal con el tejido comprimido por la fuerza de radiación generada. El procedimiento se repite para todas las líneas obteniendo dos imágenes (pre y post compresión) que se procesan mediante un algoritmo de correlación, obteniendo un mapa de las deformaciones del tejido [1][8].

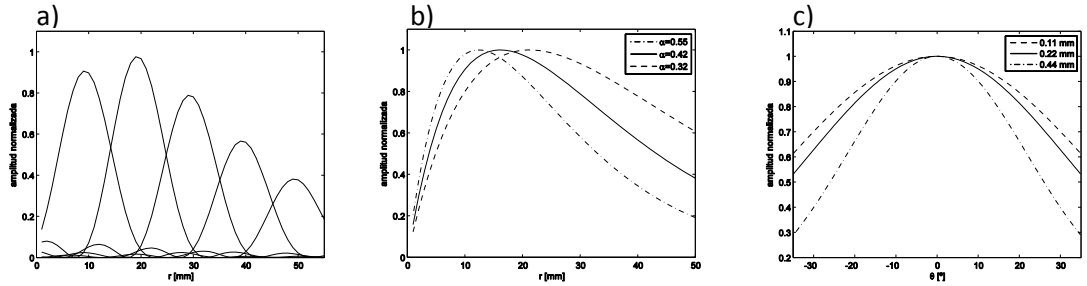



Figura 1 a) Patrón de intensidad para $z_0$=10,20,30,40,50 mm. b) Fuerza normalizada con respecto a la posición del foco para α= 0.32,0.42 y 0.55 dB/cm/MHz. c) Sensibilidad angular del array para pitch de 0.11,0.22 y 0.44 mm.

En la técnica ARFI multifocal se combinan varias SFI adyacentes generadas a diferente profundidad focal para obtener una imagen final con mayor ROE. Para una región homogénea,

la imagen final debe presentar un mapa de color también homogéneo. Para ello, es necesario realizar una serie de correcciones:

1- Corrección de la dependencia axial en cada SFI: La fuerza de radiación es proporcional a la intensidad, eq. 1, que presenta un máximo en el foco y disminuye con la profundidad. El patrón de la intensidad puede determinarse a partir de la eq. 2 [9] y se muestra en la figura 1.a para distintas posiciones del foco.

$$I(z) = \left( \sin c \frac{z - z_0}{2\lambda / (F/\#)^2} \right)^2 \quad (2)$$

donde $z_0$ es la posición del foco, $\lambda$ la longitud de onda y $F/\# = z_0 / D$ el numero F definido como el cociente entre la posición del foco y la apertura activa del transductor D. A partir de la eq 2 se determina la longitud del foco [9], lo que proporciona el número de imágenes parciales necesarias para una configuración concreta.

$$L(6dB) = 7.1\lambda (F/\#)^2 \quad (3)$$

2- Corrección del máximo desplazamiento entre SFIs: El máximo valor del desplazamiento depende de la posición del foco. Para mantener constantes las características del haz en todas las SFIs, se mantiene constante el numero F. Como consecuencia, el número de elementos activos aumenta linealmente con la posición del foco y, por tanto, también lo hace la intensidad. Por otra parte, la atenuación reduce exponencialmente la intensidad con la profundidad. La combinación de estos dos efectos hace que la fuerza de radiación en el foco varíe según la eq.4, mostrando un máximo local [10]. La figura 1.b muestra esta variación respecto a la posición del foco para atenuaciones de 0.55, 0.42 y 0.32 dB/cm/MHz.

$$F(z_0) = \frac{2\alpha f z_0 I_e e^{2\alpha f z_0}}{(F/\#) w_e c} \quad (4)$$

donde $f$ es la frecuencia del array, $I_e$ la intensidad de cada elemento y $w_e$ la distancia entre ellos (pitch).

3-Corrección de la sensibilidad angular: Al emplear un barrido sectorial, la intensidad del haz decrece con la deflexión por difracción de los elementos del array y, por tanto, los desplazamientos medidos son menores a medida aumenta el ángulo de deflexión. Esta dependencia de la intensidad con el ángulo se obtiene de la eq.5 [9]. y se muestra en la fig 1.c para distintos tamaños del elemento.

$$I(\theta) = I(0) \left( \frac{\pi w_e^2}{4\lambda r} jinc\left( \frac{w_e}{2\lambda} \sin\theta \right) \cos\theta \right)^{2k} \quad (5)$$

donde $k$ es un factor empírico calculado para ajustar la respuesta teórica a la respuesta lateral del array. Para el empleado en este trabajo se obtuvo k=1.11112, mediante un ajuste por mínimos cuadrados a un conjunto de valores medidos con un reflector de 0.15 mm de diámetro.

4-Transición entre imágenes adyacentes: La respuesta del tejido también está afectada por la aparición de ondas transversales y por su inercia, por lo que aparecen desviaciones entre SFI adyacentes. Para suavizar estas diferencias se propone la ecualización de los datos dividendo cada SFI en tres regiones, la zona central que no se corrige y dos bandas laterales de transición que son multiplicadas por una función lineal entre 0 y 1. El esquema de este algoritmo se muestra en la figura 2

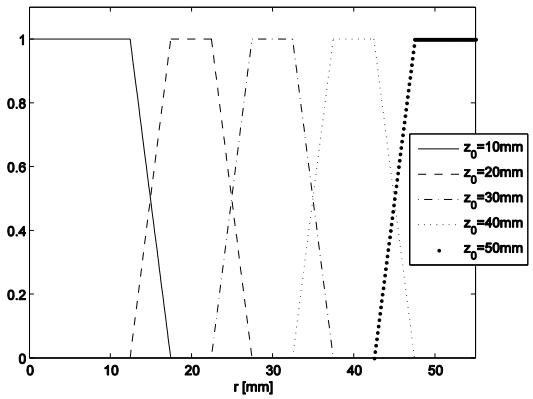



Figura 2 Coeficientes de transición entre imágenes adyacentes.

## MATERIALES

Para realizar los experimentos se empleó un sistema de imagen ultrasónica *SITAU-112* (*DASEL S.l, España)* con 128 canales de pulso-eco en paralelo. El array utilizado (*Prosonic, Corea*) es de 128 elementos, con pitch 0.22 mm y frecuencia central 3.2 MHz. La adquisición y procesado de las imágenes se realizó mediante algoritmos propios implementados en Matlab (Mathworks Inc, EEUU).

### Elaboración del Phantom

Los experimentos se realizaron en dos tipos de phantom. El primero (A) homogéneo y de elaboración propia, realizado con gelatina, grafito, alcohol, agua y formalin (25% de formaldehido) siguiendo el procedimiento descrito en [11]. Las proporciones y el módulo elástico resultante se detallan en la tabla 1.

El segundo experimento se realizó con un phantom de mama comercial (*Blue phantom*) que incluye estructuras que emulan quistes con distintas elasticidades.

| Gelatina (gr) | Agual (l) | Isopropanol (ml) | Grafito (gr) | Formalin (ml) | E (KPa) | α (dB/cm/MHz) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 96 | 1.2 | 96.25 | 117.6 | 3.6 | 25 | 0.42 |

Tabla 1 Composición, elasticidad y atenuación del phantom A

### Adquisición de los Datos

El algoritmo desarrollado genera automáticamente SFI sectoriales de 70º de apertura angular, con un paso de 0.75º entre líneas y focos entre 10 y 50 mm de profundidad separados 10 mm entre sí. El número de elementos activos en cada SFI se calcula para mantener un numero F constante de 1.8, que para un array de 128 elementos, supone un rango máximo alcanzable de 60 mm. La adquisición se realizó por contacto, usando pulsos de 312 us para generar la fuerza de radiación con un tiempo de retardo de 150 us entre la fuerza y la imagen post-compresión. Los datos de radiofrecuencia fueron procesados offline mediante un algoritmo de correlación en una dimensión con un kernel de 4λ, una superposición de 0.8 mm y un retardo máximo de 0.05 mm.

## RESULTADOS

### Phantom A

La figura 3 muestra una imagen ARFI multifocal usando la configuración descrita en la tabla I y siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. En ella se aprecian las bandas en profundidad correspondientes a los 5 focos utilizados. Sin embargo, al tratarse de un phantom homogéneo, la imagen debería ser uniforme.

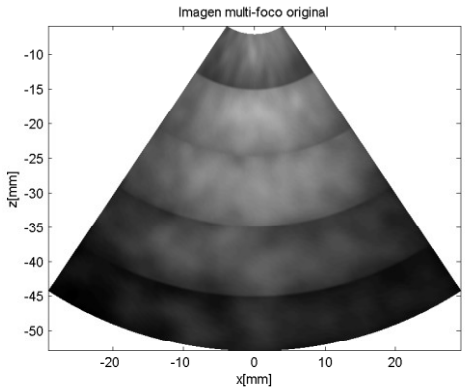



Figura 3 Imagen multifocal del phantom A sin corrección

El primer paso para combinar correctamente las imágenes consiste en corregir las diferencias debidas a la dependencia del máximo desplazamiento en función de la posición del foco, que sigue la eq.4. La fig. 4.a muestra con puntos el desplazamiento máximo de la línea central en cada foco frente a los valores teóricos (línea continua), escalados para ajustarse a los datos experimentales. El resultado de esta ecualización se muestra en la fig.4.b, donde se aprecia menor diferencia entre los máximos valores de cada banda.

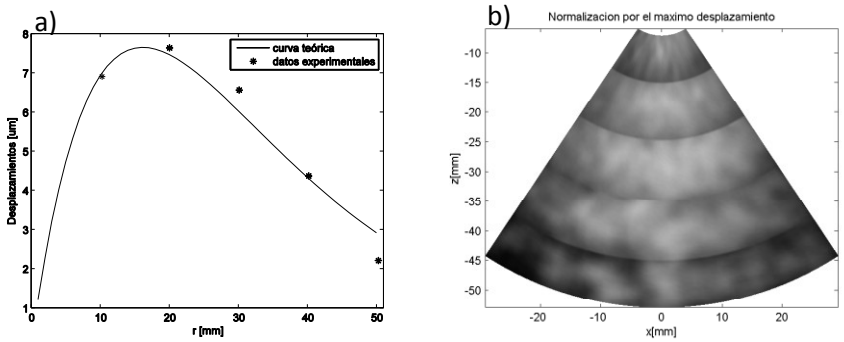



Figura 4 a) Máximo desplazamiento en cada SFI y valor teórico según la eq.4 b) Imagen ARFI tras la corrección por el máximo desplazamiento

Seguidamente se corrige la dependencia angular de los desplazamientos según la eq.5. La fig. 5a muestra con puntos los desplazamientos medidos a una profundidad de 30 mm para todos los ángulos junto con los valores teóricos (línea continua). La fig.5b muestra la imagen corregida con una reducción notable de la variabilidad angular de los desplazamientos en todas las bandas.

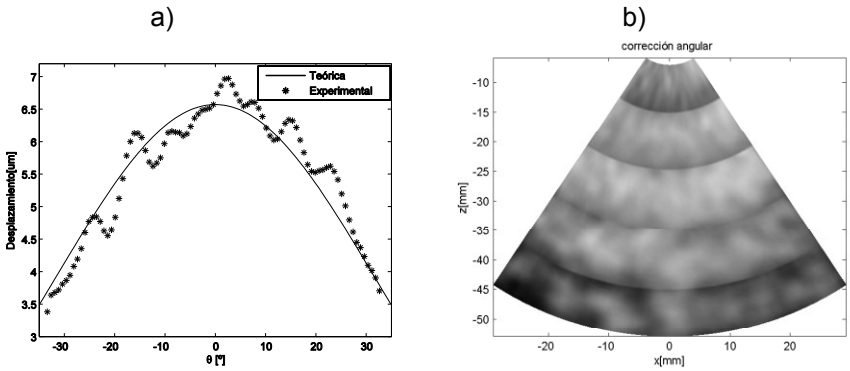



Figura 5 a) Desplazamientos medidos a 30 mm para todos los ángulos y sensibilidad teórica según la eq.5 b) Imagen ARFI tras la corrección de la sensibilidad angular

El siguiente paso es corregir la dependencia axial de los desplazamientos con la profundidad en cada banda. La fig.6a muestra con puntos los desplazamientos axiales medidos en el centro de la tercera SFI, que va desde 22.5mm a 37.5mm, junto con a los valores teóricos de intensidad según la eq.2 (línea continua). Se puede observar un ensanchamiento de la curva experimental frente a los valores teóricos. Esto es debido a que la medida experimental de la respuesta del tejido se realiza 150 us después de eliminar la fuerza. Durante ese tiempo se produce la recuperación del tejido hacia su posición inicial, lo que produce un ensanchamiento de la curva [12]. Además, la eq.2 predice la intensidad en onda continua produciendo ceros entre el lóbulo principal y los secundarios, que no se darán en la realidad. Por estas razones se considera mejor emplear para el ajuste la envolvente de la curva teórica

$$I(z) = e^{\frac{\log\left(\mathrm{sinc}(3/2)^2\right)}{(2Sz_0 3/2)^2}(z-z_0)^2} \quad (6)$$

donde $S = z_0\lambda / (D/2)^2$.

Esta curva se muestra en línea discontinua en la fig. 6a, donde se verifica un mejor ajuste a los datos experimentales. La fig. 6b muestra la imagen multi-foco una vez realizada esta corrección. Los desplazamientos en cada banda son ahora más uniformes.

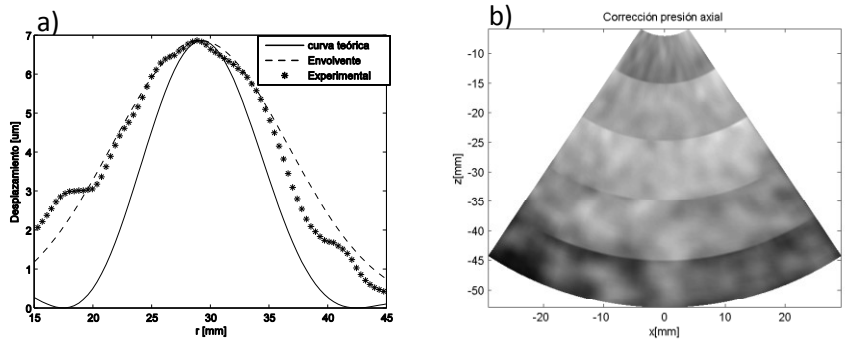



Figura 6 a) Desplazamientos medidos en la tercera SFI y valor teórico según la eq.2 y 6 b) Imagen ARFI tras la corrección de la dependencia axial

El último paso consiste en suavizar las transiciones entre bandas. Para ello se aplican los coeficientes de la fig. 2. La imagen inicial y final se muestra en la fig. 7a y 7b, donde se puede apreciar que tras la corrección, la transición entre bandas es apenas perceptible. Sin embargo, se observa que la última banda está sub-compensada respecto al centro de la imagen. Esto es debido a que los desplazamientos a estas profundidades son del orden del mínimo detectable (2.3 um para nuestro sistema [13]) y por tanto aumenta la desviación entre los valores medidos y los esperados.

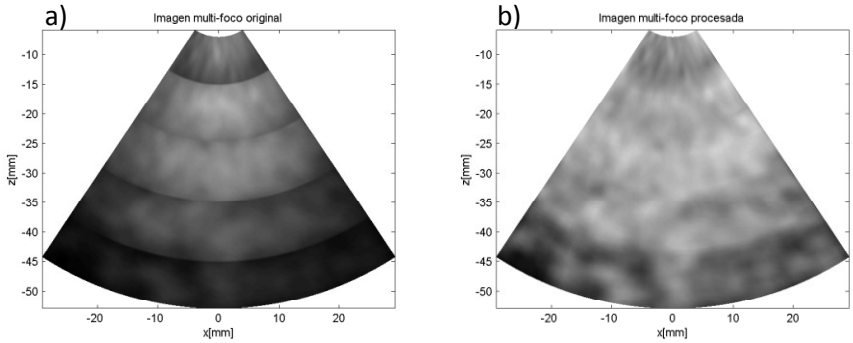



Figura 7 a) Imagen Multi-focal original b) Imagen Multi-focal corregida

**Blue Phantom**

En el experimento con el phantom comercial se utilizó la misma configuración que con el phantom A.

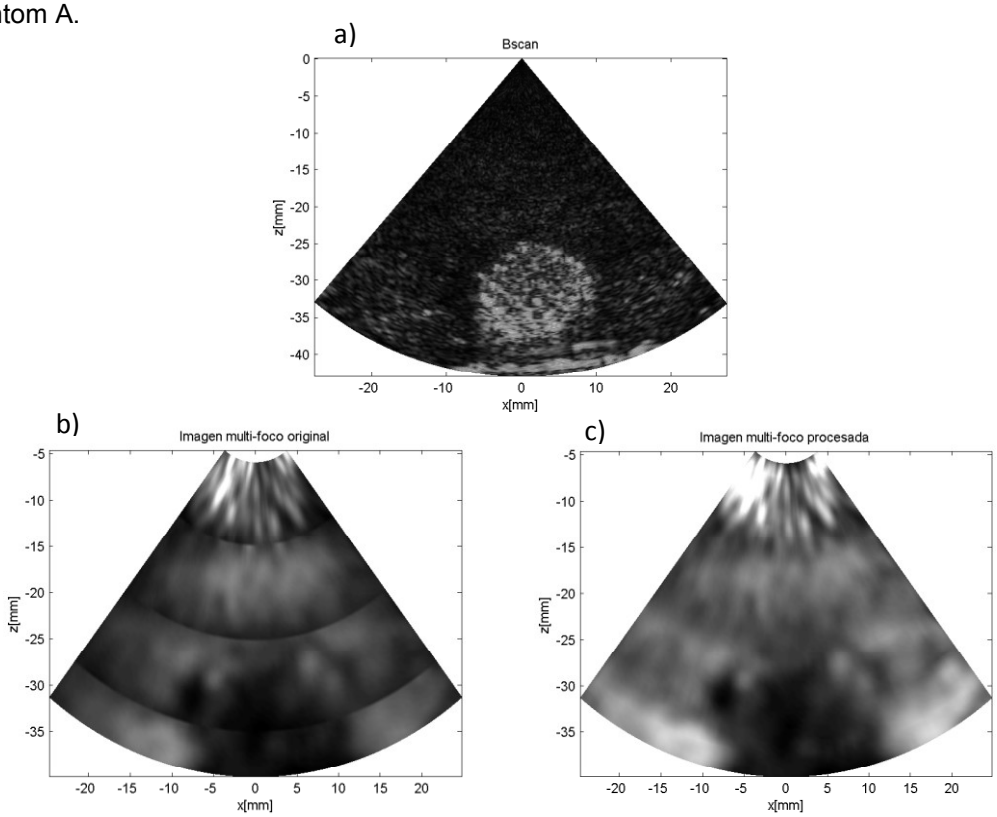



Figura 8 a)B-scan que muestra una masa solida. b) Imagen Multi-focal original c) Imagen Multi-focal corregida

La fig. 8a muestra un B-Scan convencional donde se distingue una masa hiper-ecogénica. La imagen multi-foco original se muestra en la fig. 8b y la imagen multi-foco resultante tras el procesado en la fig. 8c. Tras aplicar el algoritmo de corrección se obtiene una imagen más homogénea que provee mejor información estructural del quiste, en este caso más rígido que el fondo.

## CONCLUSIONES

Las imágenes de elasticidad generadas con ARFI son un gran complemento a la imagen de reflectividad convencional, puesto que permiten identificar tumores malignos por sus propiedades elásticas (mayor dureza que los tejidos sanos). Sin embargo, su escasa profundidad de foco dificulta la obtención de una imagen completa del tejido en un sólo disparo. Para ampliar el rango es necesario combinar la información de varias sub-imágenes enfocadas a distinta profundidad. En este trabajo se presentó un algoritmo para combinar dichas SFI en una única imagen, corrigiendo las variaciones debidas a la posición del foco, la sensibilidad angular y la geometría del haz, incluyendo la ecualización de la imagen final para suavizar la transición entre bandas. Todo el procedimiento se realiza de forma automática, usando datos del sistema de imagen conocidos a priori y una medida global de la atenuación del sonido en el tejido. Los resultados obtenidos confirman el buen funcionamiento del algoritmo de compensación que provee imágenes uniformes en phantoms homogéneos y mejor información estructural en phantoms con distintas elasticidades.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Español, bajo el proyecto DPI2013-42236-R, del ministerio de economía y competitividad, por el Programa de Formación Universitaria FPU 2012, beca FPU12/02187, y por el proyecto S2013/MIT-3024 TOPUS-CM de la Comunidad de Madrid.

## REFERENCIAS

1. K. Nightingale, M. Soo, R. Nightingale, G. Trahey. Acoustic radiation force impulse imaging: In vivo demonstration of clinical feasibility, in: Ultrasound Med. Biol 2002;vol. 28(no 2):227–235. [PubMed:11937286]
2. K. Nightingale, M. Palmeri, R. Bouchard, and G. Trahey. Acoustic radiation force impulse imaging: a parametric analysis of factors affecting image quality, in: Proceedings of the 2003 IEEE Ultrasonics Symposium, 2003.
3. A. Sharma, M. Soo, G. Trahey, K. Nightingale, and A. Congdon. Acoustic radiation force impulse (ARFI) imaging of in vivo breast masses, in: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symp., 2004, vol. 1, pp. 728–731.
4. A. Sharma, G. Trahey, K. Frinkley, M. S. Soo, M. Palmeri, and K. Nightingale. Image processing and data acquisition optimization for acoustic radiation force impulse imaging of in vivo breast masses, in: SPIE Proc. Medical Imaging, 2005, vol. 5750, pp. 205–215.
5. M. Palmeri, J. Dahl, D. MacLeod, S. Grant, and K. Nightingale. On the feasibility of imaging peripheral nerves using acoustic radiation force impulse imaging, in: Ultrason. Imaging, vol. 31, no. 3, pp. 172–182, Jul. 2009.
6. W. Nyborg. Acoustic streaming, in: Physical Acoustics, vol. IIB, W. Mason, Ed. New York, NY: Academic, 1965, ch. 11, pp. 265–311.
7. G. Torr. The acoustic radiation force, in: Am J Phys, vol. 52, pp. 402–408. 1984
8. J. Doherty, G. Trahey, K. Nightingale and M. Palmeri. Acoustic Radiation Force Elasticity Imaging in Diagnostic Ultrasound, in: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 60, no. 4, pp. 685-701, Apr 2013.
9. G. Kino. Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing, by Prentice-Hall, Inc. A division of Simon & Schuster. Englewood Cliffs, New Jersey. 1987
10. M. Palmeri, K. Frinkley, K. Oldenburg, and K. Nightingale. Characterizing Acoustic Attenuation of Homogeneous Media Using Focused Impulsive Acoustic Radiation Force, in: Ultrason Imaging, vol. 28, no. 2, pp.114-28. Apr 2006

11. Hall TJ, Bilgen M, Insana MF, Krouskop TA. Phantom materials for elastography. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr 1997;vol. 44(no 6):1355–1365.
12. M. Palmeri, A. Sharma, R. Bouchard, R. Nightingale and K. Nightingale. A Finite- Element Method Model of Soft Tissue Response to Impulsive Acoustic Radiation Force, in: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 52, no. 10, pp. 1699-1712, Oct 2005.
13. W. Walker, and G. Trahey. A fundamental limit on delay estimation using partially correlated speckle signals, in: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 42, no. 2, pp. 301-308, Mar 1995.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# DEVELOPMENT OF AN ULTRASONIC SYSTEM FOR OBJECT RECOGNITION

**PACS:** 43.35.Yd

Gao, Chang[1]; Wang, Nanli[1]; de la Madrid Descalzo, Lorena[2]; Ferri, Marcelino[3]; Bravo, José María[4]; Sánchez-Pérez, Juan Vicente[4]

[1] International School, Beijing University of Posts and Telecommunications. 10 Xu TU Cheng Road, Haidian Districe Beijing, 100876. China; cgao@se11.gmul.ac.uk; nanly.wang@gmail.com
[2]Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia-Camino de Vera s/n. 46022 Valencia; lodela4@teleco.upv.es
[3]Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, EPS Gandia; mferri@fis.upv.es
[4]Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU; jobrapla@fis.upv.es; jusanc@fis.upv.es

## ABSTRACT

The use of ultrasonic signals for recognition of persons has been usually used for its effectiveness and accuracy. Two are the methods usually employed for this purpose: The phase-shit analysis and the time delay related with the echo-impulse technique. In this work, we present preliminary results related with the obtaining of three-dimensional images of different shapes, as well as the development of the method to obtain images of persons. The system of pattern recognition is a combination of hardware and software. The goal is to find the system with lower computing time and more accurately.

## RESUMEN

El uso de señales ultrasónicas para reconocimiento de personas ha sido ampliamente utilizado por su efectividad y precisión. Dos son las metodologías más utilizadas: El análisis de la variación de fase y la técnica de eco-impulso. En este trabajo se presentan resultados preliminares relacionados con obtención de imágenes tridimensionales de diferentes formas, así como el desarrollo de un método para obtener imágenes de personas. El sistema de reconocimiento es una combinación de hardware y software. El objetivo es encontrar el sistema con menor coste de tiempo computacional y mayor precisión.

## BACKGROUND

Ultrasound plays a remarkable role in human life. From non-destructive testing to medical diagnosis. The unique physical peculiarity of ultrasound provides it processing many advantages. Associating with the unique physical peculiarities of ultrasound, it is an advanced method to do

object recognition. Compared with others techniques of object recognition, it works in a larger detection range and depth with accuracy defected position. With the properties of low cost technique and harmless to the human body, ultrasonic system has becoming a most widely used technique with highly growth speed [1].

## TECHNIQUES

### Echo-Impulse Method

This method base on counting the propagating time of the ultrasound signal. The transducer emits the signal then the signal would be received after reflected by the object. In the figure1, the signal emitted by the transducer A is reflected at the “reference rigid surface” and come back to the transducer B. The total time since the signal is emitted until is received is tA=t1+t2. The signal that has been used in this method is the pulse signal. Based on this time difference it is possible to reproduce the shape of different objects[2] (Figure 1). In figure, signal is emitted and received by the same transducer. In our experiment we not use a single transducer emits and receives, so that the sender and recipient are two different elements.

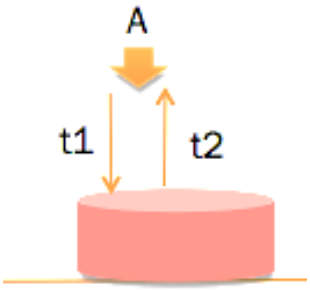



**Figure 1.** Basis of the echo-impulse technique

### Phase Shift Analysis Method

In order to improve the view of the object under study it was used the technique of phase shift. The system configuration was practically the same as for the study of flight time, but the information to be analyzed corresponded to the phase change with respect to a reference phase value.
Practice made this technique was not used because it did not provide improvements. However, it could be interesting for small items with less than the wavelength size.

## SIGNAL PROCESSING

### Hilbert Transform

Hilbert transform is a useful tool in the field of digital signal processing. It can be used to detect the envelop of the ultrasonic signal and obtain the peak point of the envelop. The result of Hilbert transform working in a real function x(t) is the output of x(t) passing a linear time invariant system.

There are some relationships in the real part, imaginary part, amplitude-frequency response and phase-frequency response of a real signal x(t) or x(n) after Fourier transform. Assume the Hilbert transform of the function x (t) is $\hat{x}(t)$.

Hilbert transform can be write as

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{x(\tau)}{t-\tau}d\tau$$

There is a type of signal could be expressed as

$$x(t) = a(t)\cos(\Omega_o t + \varphi(t))$$

a(t)is a signal with low frequency and $\phi(t)$ is the phase function.

The Hilbert transform of this signal is

$$\hat{x}(t) = a(t)\sin(\Omega_o t + \varphi(t))$$

The envelop of the signal is

$$|a(t)| = \sqrt{x(t) + \hat{x}^2(t)}$$

**Ema And Lema**

Ema and Lema are functions to smoothen the obtained signal. The quality of detected image would be improved after applying these functions.

One function that used called Ema write formulas as here:

$$Ema = \frac{1}{\tau}\int_{t_0}^{t_0+\tau}[x(t)]dt$$

Another one named Lema

$$Lema = \frac{\int_{t=-\infty}^{t_0}[x(t)]e^{-\frac{t_0-t}{\tau}}dt}{\int_{t=-\infty}^{t_0}e^{-\frac{t_0-t}{\tau}}dt}$$

## IMPLEMENTATION

This project can be separated into two parts. The first part is about experiments. Two important parameters are chosen to observe the influence to the detected images. The experiments start with detecting cuboid then gradually increase the complexity of the object. The second part is involving treating the data obtained in the experiment. In this section, we mainly start from two directions. One direction is using Hilbert transform to instead of Energy function. Another function is adding new functions to smooth the original signal. The steps of the project can be seen in Figure 2.

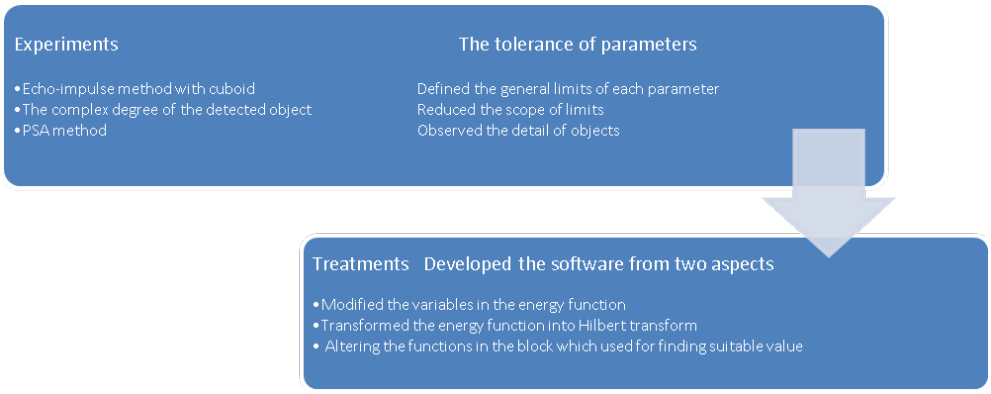



**Figure 2.** Steps of the Project

## HARDWARE STRUCTURE

The hardware structure includes the parts of preparing work and the set-up of the software. The sequences to open the machines should be strictly followed when preparing work. The first machine that should open is the generator. It works to generate the signals that used in the experiment. The type of the signal is choosing in software named 3DREAMSUltra (Three Dimensional e-Acoustic Measurement System Ultra). The frequency and amplitude also set in this software. Then connecting the generator with oscilloscope to observe the signal whether satisfies the quality. The other wire linking to generator is connected with the emit transducer.

The second one is the Cartesian Robot. It plays the most important role in the experiment because it is the part used to detecting the object. This machine also is controlled by software named 3DREAMSUltra. Cartesian Robot is composed with transducers and a movement system. The set up of the transducers had been defined in the past experimenters. In the Echo-Impulse method, only one transducer is used in the experiment. This transducer is not only responsible for emitting signal but also handling received signal.

In the PSA method, there are two transducers working in the experiments. One used as the emitter and the other one is responsible for the received signal. The movement system can take the transducers to scan the whole place after the map is generated by 3DREAMSUltra. The limit of the movement system need to be noticed when the map of movement has been created. The limits alone to the semi-axis OX and OY could be fixed in the software. It means that the input value should less than limiting value when setting the movement map. But the semi-axis OZ cannot be defined before the experiment. Pressing the STOP button in the Cartesian Robot would be the only way to stop the move in this direction if the transducers working more than its scope.

The last machine that has to open is the computer. Then 3DREAMSUltra can be set then processing data through Matlab.

## RESULTS

Ten groups of images have been obtained after conducting all experiments and develop the software. Group one to group five works with Echo-impulse method. Group six to group ten have been obtained by PSA method. The first and sixth groups are showing the images of single cuboid. A shape of two half-cylinders with curved surface upward behind a cube is the detected object of the second and seventh groups. The complexity of detected object is gradually increasing in each part. In the first three groups of each part, there are 40 images in each group. The images are changing with the two parameters. In the last two groups of each part, the numbers of images are decreasing to 20. The result of this performance is the reducing of the detecting value in one parameter.

In the third and eighth, the parts are the same with last groups but the angle of the half-cylinders has been modified which take the flat surface upward. In the fourth and group ninth, the results describe the pictures of the object that used in groups third and eighth adding a cylinder above the cube. The last two groups in each part are showing the object used in groups third and eighth with a half- cylinder above the cube.

### Acceptable Range Of Two Parameters

The performance of detection is different with the technique, which used in the collecting data. Therefore the results are separated to discuss when defining the acceptable range in the project. After this step, the improvement has been demonstrated in the developed software.

The images of a cuboid with variety values of parameters are used to define the acceptable range of two parameters. According to the Table1 (Table 1 results of detecting cuboid with different parameters), the images are showing better performance when the range between 40mm to 90 mm and fixed the distance of each collecting points. In the height in 60mm, the images are clearer than the others. If the height has been fixed into 60mm, the limits of the object would become ambiguous when the distance of each collecting point is more than 8mm.

The scope of the variables is gradually decreasing. For the second and third sets of experiments, the shape still could be recognized till the distance between collecting points achieved 8mm. in the second set of experiments, the interfering signal not showing much damage in the image. But the changing of the ‘arm’ is hardly to be recognized. In the last of two object, the distance of acceptable range is reduce to 6mm because the affect of ‘head’.

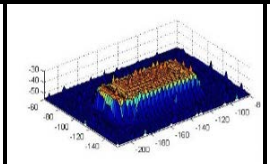
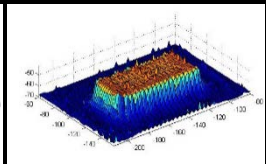
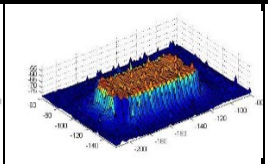
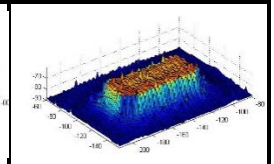
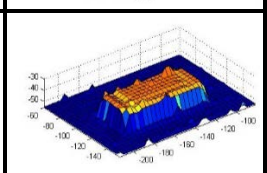
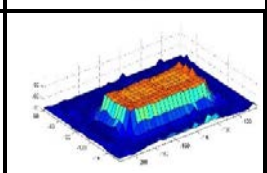
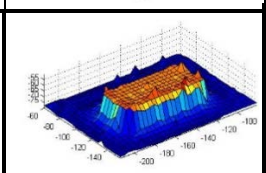
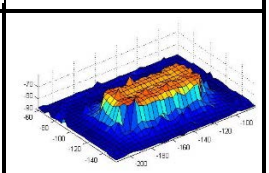
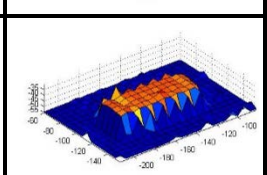
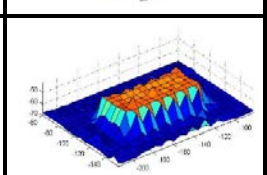
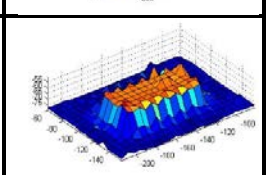
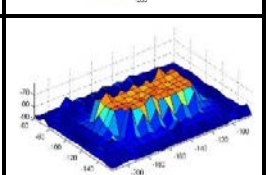
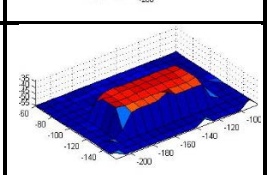
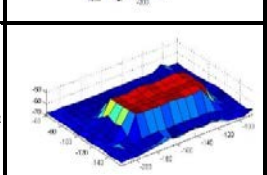
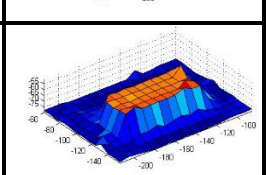
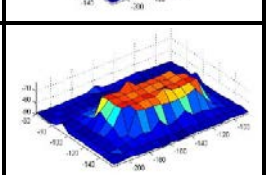
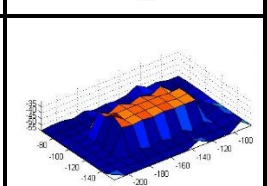
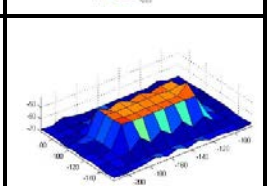
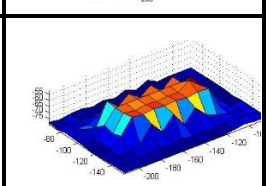
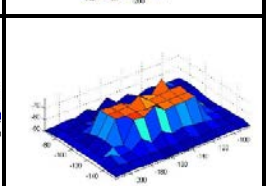
| Height / Distance | 20mm | 40mm | 60mm | 90mm |
|---|---|---|---|---|
| 2mm |  |  |  |  |
| 4mm |  |  |  |  |
| 6mm |  |  |  |  |
| 8mm |  |  |  |  |
| 10mm |  |  |  |  |

**Table 1.** Results of detecting cuboid with different parameters

Therefore, the acceptable values of height are from 90mm to 40mm. The acceptable value of the length is between 6mm to 4mm.

### Fastest Method In Calculation

Hilbert transform with original function make a huge improvement in saving time after the time of each improve method has been calculated.

| Obtained the Envelop / Smoothed the envelop | Energy function | Hilbert transform |
|---|---|---|
| | 240s | 60s |
| Ema | 480s | 180s |
| Lema | 900s | 900s |

**Table 2.** Time consuming in each method

The calculation time would change according to the different type of computer and we do not want to compare absolute times. It should be notice that every method has been ran in same physical conditions to compare times with different techniques. It is obviously that when altering the Hilbert transform in to the project. The efficiency has been improved four times than before. From the images of two methods in Table3 (Table 3 Compared Energy function with Hilbert transform), it is clear that the quality of ultrasonic images is similar. Therefore if we want to use the system into a time saving environment, the software with Hilbert transform is the best choice.

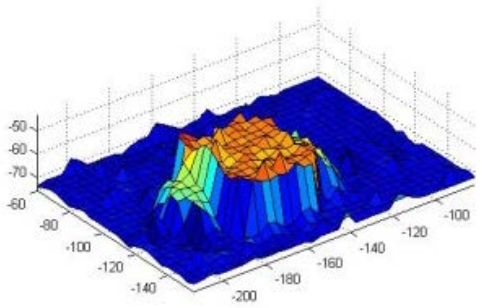
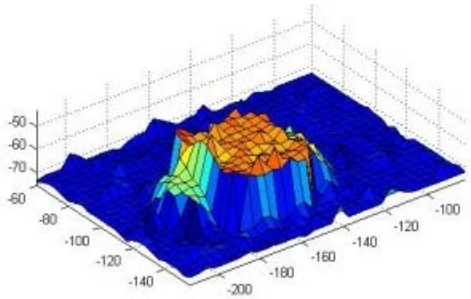
| Energy function | Hilbert transform |
|---|---|
|  |  |

**Table 3.** Compared Energy function with Hilbert transform

**Best Quality Of Ultrasonic Image**

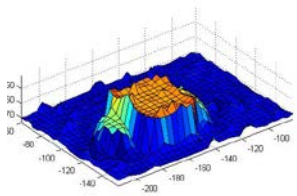
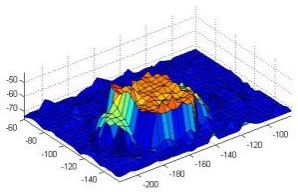
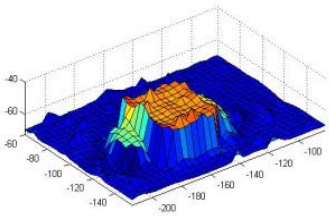
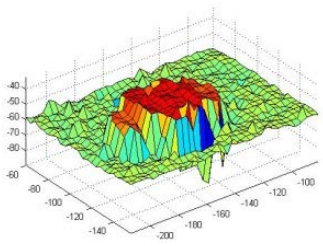
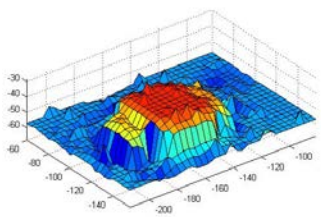
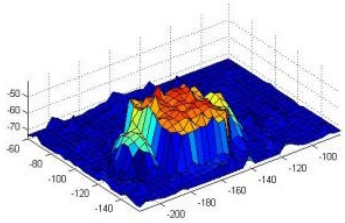
| | Energy function | Hilbert transform |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Smooth Ema function |  |  |
| Smooth Lema function |  |  |

**Table 4.** Compared Energy function with Hilbert transform

Putting the images in the same conditions assure the accurate of compartment. Table 4 (Table 4 results of the ultrasonic images processing by each method) gives us a convenience way to draw the conclusion. There are two aspects of the quality need to be noticed. One is the clear degree of the edges. It is no doubt that the images produced by Energy transform and Ema function provides the greatest result in these images. It is the only one method clearly demonstrating the connecting areas of two blocks. Another part to test the improvement is the flat degree of surface. The image produced by the Lema function with the Energy function showing a clear edge of the object and a more flat surface in the surface. After considering with the combination of the time consuming and the quality of images, the improved energy function with Ema function are the suitable one for our system.

In case of the occasionally inside the experiments, other shapes of object also has been tested to confirm the result. Other images also demonstrate the same regular of each method. Therefore the software is steady and the characters of each method are occupied normal usability.

## CONCLUSION

The purpose of this project is to define a structure of a detection system to improve the quality of detected image with the assistance of ultrasound. We design many experiment with different methods to correspond with the distinct requirements. At the end of this project, the results showing we successfully realize the goal. The system not only can produce the clearest ultrasonic image but also can reduce working time comparing to the original detected system. In the future, the extend of this project can aim to the part of user interface.

## REFERENCES

[1] Heinrich Kuttruff. *Ultrasonics Fundamentals and applications.* Elsevier Applied Science (1991)

[2] Bravo, JM; Sánchez-Pérez, J. V.; Ferri, M.; Redondo, J.; Picó, R.; *Application of Ultrasound Phase-Shift Analysis to Authenticate Wooden Panel Paintings*. Sensors (2014), 14, 7992-8002; doi:10.3390/s140507992.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# DETECCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS NO LINEALES

PACS: 43.40.Cw

Ramis, Jaime[1]; Carbajo, Jesús[1]; Poveda, Pedro[1]; Ivorra, Salvador[2]; López, M. Pilar[2]; Antón, Carlos[2]; Climent, M. Angel[2]
[1]Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.
[2]Departamento de Ingeniería Civil.
Universidad de Alicante.
Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.
Tel. 96 590 34 00
Fax. 96 590 34 64
Email: jramis@ua.es

## ABSTRACT

This communication presents the results of a test performed to detect, in its early stages, the corrosion of reinforced concrete structures. Two types of structures have been used: one-meter-high pillars and two-meter-long beams. The corrosion has been accelerated by electrochemical methods. The experimental setup consists of two transmitter transducers (29 and 33 kHz) and several broadband receivers. The emergence and growth of corrosion is evaluated quantifying the amplitude of higher harmonics, intermodulation and the generation of subharmonics.

## RESUMEN

En la presente comunicación se presentan los resultados de un ensayo llevado a cabo con el objetivo de detectar, en su fase inicial, la corrosión en estructuras de hormigón armado. Se han construido dos tipos de estructuras: pilares, de un metro de altura y vigas de 2 metros de longitud. La corrosión se ha acelerado por métodos electroquímicos. La configuración experimental está formada por dos transductores emisores (de 29 y 32 kHz) y varios receptores de banda ancha. La aparición y el aumento de la corrosión se evalúa cuantificando la amplitud de los armónicos de orden superior, la intermodulación y la generación de subarmónicos.

## 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

En el campo de la detección no destructiva de la corrosión del acero en el hormigón destacan, por sus prestaciones, las técnicas electroquímicas, que miden propiedades de la interfase acero-hormigón, tales como el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Esta última propiedad es la que permite cuantificar la intensidad de la corrosión. La aplicación de estas técnicas únicamente requiere el disponer de una conexión eléctrica a las armaduras, ya que su continuidad eléctrica permite realizar determinaciones incluso en puntos bastante alejados de dicha conexión. Por ello estas técnicas pueden calificarse de mínimamente disruptivas para la estructura en estudio, en comparación con otras técnicas que requieren la extracción de testigos o muestras sólidas de hormigón.

El potencial de corrosión de un metal, potencial electroquímico medido frente a un electrodo de referencia, proporciona información sobre la naturaleza de la interfase metal-medio electrolítico. Es decir dicho potencial adopta valores diferentes si la superficie metálica está pasivada, o si está experimentando o ha experimentado un proceso de corrosión generalizada o localizada [1]. En el caso del hierro y el acero al carbono las superficies pasivadas se caracterizan por un potencial de corrosión relativamente elevado, mientras que las superficies despasivadas, que están sufriendo corrosión, presentan potenciales de corrosión inferiores (aproximadamente 400 o 500 mV inferiores a los del metal pasivado) [2]. Por ello la medida del potencial de corrosión del acero se ha utilizado desde hace tiempo como técnica de detección de la corrosión en estructuras de hormigón armado y pretensado [3, 4].

La electroquímica ha proporcionado técnicas instrumentales sencillas para determinar la velocidad de corrosión de un metal sumergido en una disolución acuosa, tal como la medida de la resistencia de polarización [5]. Esta técnica está basada en la aplicación de una pequeña perturbación eléctrica a la muestra en estudio (pequeño pulso de corriente o barrido de potencial en el entorno del potencial de corrosión). De la respuesta obtenida (curva densidad de corriente-potencial) se puede determinar la resistencia de polarización y de ella la velocidad de corrosión, que normalmente viene expresada en unidades electroquímicas (microA/cm2), pero que permite su recálculo en términos de pérdida de masa del metal por unidad de tiempo y unidad de superficie (mg/(año cm2)), o bien en términos de avance de la corrosión (micras/año) en los casos de corrosión generalizada, mediante aplicación de las leyes de Faraday. Hace algún tiempo se demostró la aplicabilidad de dicha técnica a pequeñas probetas de acero embebidas en mortero y hormigón [6], y posteriormente al estudio de estructuras reales de hormigón armado y pretensado [7]. Ello abrió la puerta para la cuantificación de los daños por corrosión (pérdida de sección de las barras), al menos en los casos en que la corrosión es de tipo generalizado. Hoy en día existe bastante experiencia sobre su aplicación al estudio de estructuras reales [8, 9].

La determinación de la velocidad de corrosión del acero en estructuras, mediante la técnica de la resistencia de polarización, requiere la utilización de corrosímetros especiales [7] que permitan realizar compensaciones de la caída óhmica debida a la elevada resistividad del homigón y que permitan confinar la señal eléctrica a una zona limitada de la barra de acero en estudio, para poder cuantificar la velocidad de corrosión en términos de la superficie de acero (microA/cm2).

Llegados a este punto, es necesario realizar algunos comentarios sobre el potencial de corrosión y de la Intensidad de Corrosión que son los dos parámetros habitualmente utilizados para caracterizar el estado de las estructuras desde el punto de vista de la corrosión.

El Potencial de Corrosión permite conocer de forma cualitativa el estado del acero en el momento en el que se realiza la medida. Su valor nos da una idea de la susceptibilidad del acero a estar sufriendo procesos de corrosión, y por tanto se habla de “probabilidad de estar sufriendo corrosión”. Esta probabilidad es más alta, cuanto más negativo sea el valor de Ecorr.

La Intensidad de Corrosión es una medida de la velocidad a la que se están desarrollando las reacciones oxidación-reducción sobre la superficie del acero, en el momento en el que se lleva a cabo la medida. La velocidad de estas reacciones depende de muchos factores externos, como por el ejemplo el grado de humedad del hormigón, que pueden hacer que en determinados momentos la Icorr sea muy elevada y en otros muy baja.

Es posible que un acero haya sufrido daños por corrosión durante un largo periodo de tiempo, pero que por determinadas circunstancias (como el cese de aporte de humedad) llegue un momento en el que las reacciones de oxidación-reducción cesen su actividad. Si realizásemos entonces una medida, los valores de Icorr registrados serían muy pequeños. Sin embargo, el valor de Ecorr sería negativo. Este hecho, junto con una inspección ocular de la zona, nos haría pensar que aunque la corrosión no es activa en el momento de la medida, el acero se encuentra en algún grado dañado por procesos de oxidación previos.

A la hora pues de evaluar una estructura que está sufriendo posibles daños por corrosión, no basta con la medida puntual del potencial y la intensidad de corrosión, sino que es necesario llevar a cabo una inspección visual de la zona detectando posibles daños ya visibles, presencia de grietas, manchas de óxido, posibles filtraciones de agua, etc. Asimismo, las medidas con el corrosímetro deben hacerse en forma de mapeo de manera que se cubra una superficie lo suficientemente representativa.

Si lo que se busca es una parámetro que mida en sí mismo el posible daño que ha sufrido una estructura por corrosión, esto es, el grado de fisuración interno desarrollado, este no existe tal

cual, de ahí la búsqueda de técnicas no destructivas que puedan complementar o mejorar la información que vienen aportando durante años las medidas in situ de Ecorr e Icorr.
En las tablas 1 y 2 se recoge, de forma resumida, la relación entre el riesgo de corrosión y los parámetros Ecorr e Icorr respectivamente.

Tabla 1: Riesgo de corrosión a partir del dato de Ecorr. Fuente: ASTM C876

| Potencial de corrosión<br>$E_{corr}$ (mV vs. $Cu/CuSO_4$) | Riesgo de corrosión |
|---|---|
| < -350 | Elevado |
| -350 a –200 | Incierto |
| > -200 | Bajo |

Tabla 2: Nivel de corrosión en función del valor de Icorr registrado. Fuente: Test methods for on-site corrosion rate measurements of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metalic Corrosion

| Densidad de corriente de corrosión<br>$I_{corr}$ ($\mu A/cm^2$) | Nivel de corrosión |
|---|---|
| < 0,1 | Despreciable |
| 0,1 a 0,5 | Moderado |
| 0,5 a 1 | Elevado |
| > 1 | Muy elevado |

El ensayo se lleva a cabo en el contexto de un proyecto cuyo objetivo es utilizar la no linealidad inducida en el medio cuando es excitado con señales ultrasónicas de alta potencia para cuantificar el grado de corrosión con el objetivo de detectar el inicio del proceso de corrosión para que se puedan tomar medidas correctoras. Se trata, por tanto de una propuesta alternativa y complementaria las técnicas que se utilizan en la actualidad [10].
En la práctica la configuración experimental necesaria para llevar a cabo experimentos de ensayos no destructivos estaría formada por un generador de señal, un amplificador de potencia, un transductor emisor, uno o varios transductores receptores con sus respectivos preamplificadores, una tarjetas de adquisición de datos con las entradas suficientes. Los registros efectuados serían procesados en el espacio frecuencial. Si la estructura bajo estudio se excita con una señal tipo burst de una frecuencia central, la aparición a la salida de armónicos de orden superior al de la entrada (distorsión armónica) , de orden inferior - concretamente la mitad (generación paramétrica) son síntomas de que se ha producido no linealidad en el medio. La aparición de los armónicos y su amplitud respecto al fundamental está relacionada con la aparición de microfisuras que, en este caso, están inducidas por la corrosión. También sería reflejo de la presencia de no linealidad en la propagación en el medio el hecho de que al excitar la estructura con dos señales de frecuencias cercanas aparezcan términos asociados a la intermodulación.
Se han planteado plantean dos tipos de experimentos con elementos estructurales: una viga (figura 1) y el arranque de un pilar (figura 2). Se han fabricado cuatro especímenes de cada uno de ellos, de hormigón con unas características similares a las de una ejecución habitual (HA - 30 / B / 20 / IIa) armado con acero B500S. Se han analizado los valores del armado longitudinal y transversal para garantizar tanto las cuantías geométricas mínimas indicadas por la EH-08 como para verificar los estados límites de servicio en función de las cargas introducidas. En el caso de las vigas, el ensayo se ha realizado el ensayo con la viga biapoyada en L/4 de cada extremo introduciendo una carga uniforme mantenida en los tramos de la viga que quedan en voladizo. Como consecuencia de esta carga se obtiene en la sección central un diagrama de momentos constante lo que implicará que la cara superior ha estado sometida exclusivamente a esfuerzos normales de tracción constante durante el periodo de ejecución de los ensayos. Al mismo tiempo tanto las vigas como los pilares se han sometido a un proceso de corrosión acelerado en la sección central simulando un ambiente agresivo. En cuanto a la segunda configuración para el estudio de la evolución de la corrosión en un arranque de un pilar se han construido tres zapatas cuadradas de 75x75x40 cm en las que se dispondrán las esperas correspondientes de las que arranca un pilar en cada una de ellas de

30x30 cm y una altura de 1 m. Sobre la zapata se ha dispuesto un revestimiento a base de resina epoxi para impermeabilizarlo y se ha inducido la corrosión en esta zona como es habitual en algunos casos de patología estructural. En este caso el pilar estará sometido a su peso propio exclusivamente.
Con el objeto de acelerar la corrosión, el hormigón a utilizar en la confección de los elementos mencionados (vigas y pilares) ha sido aditivado, o contaminado electroquímicamente, con una cierta cantidad de cloruro (aproximadamente 2% Cl- referido a masa de cemento). Además, durante los experimentos la corrosión se ha forzado electroquímicamente mediante aplicación de una densidad de corriente anódica constante de valor entre 100 y 500 μA/cm2

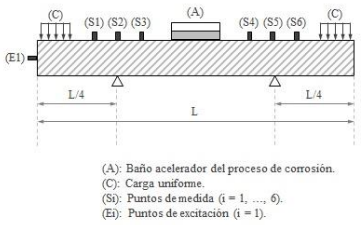



Figura 1: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

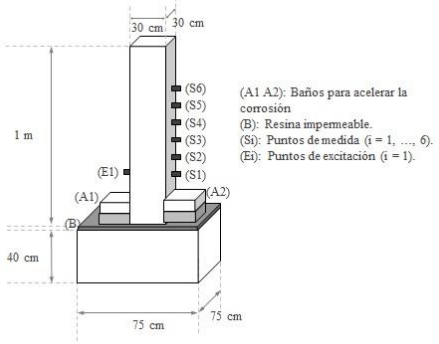



Figura 2: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

El diagrama de bloques del proceso de caracterización se muestra en la figura 3. La señal de test es amplificada y excita los transductores emisores que están colocados en la estructura. Los transductores receptores recogen la señal que es preamplificada y registrada para se analizada.

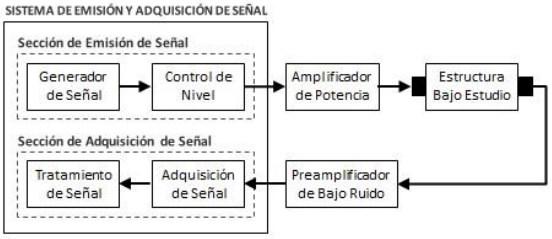



Figura 2: Diagrama de bloques de la configuración

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

En la fotografías 4 y 5 se muestran los pilares en el encofrado y, una vez desencofrados, pasado el periodo adecuado, listos para ser estudiados

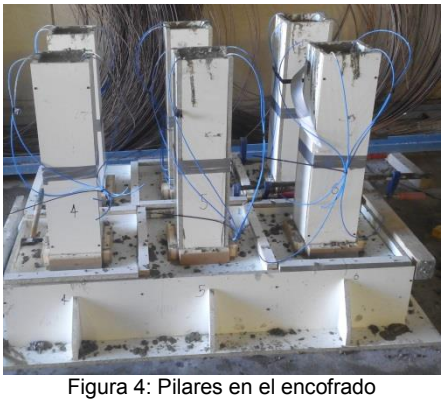


Figura 4: Pilares en el encofrado



Figura 5: Pilares listos para comenzar el estudio

El primer paso es construir la cubeta que sirve de depósito para la disolución que acelera el proceso de corrosión tal como se muestra en las figuras 6 y 7, en las que se puede apreciar:

La ubicación de los transductores emisores y receptores, los puntos donde se coloca la carga (en el caso de las vigas), y en los que se realizan medidas de índices electroquímicos relacionados con la corrosión

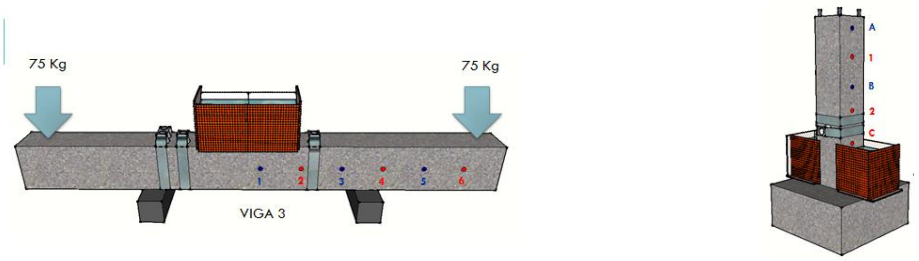



Figura 6 : Posicionamiento de los transductores en las estructura tipo viga y pilar y puntos de medida de parámetros electroquímicos

En las figuras 7 (Izquierda y derecha) se muestra en detalle la ubicación e instalación de los transductores emisores que son tipo Langevin fabricados con PZT8 como elemento activo, cuyas impedancias eléctricas se muestran en la figura 8. El transductor 1 se ha aplicado para excitar los elementos constructivos con el objeto de cuantificar la aparición de armónicos de orden superior (y, en su caso, inferior). Se han utilizado los dos transductores al mismo tiempo para excitar la estructura para provocar la aparición de intermodulaciones de primer orden (señales suma y resta de las dos señales de excitación)

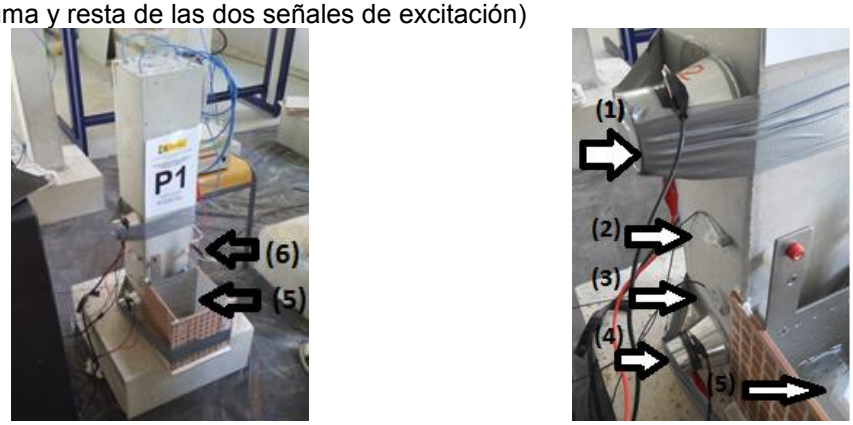



Figura 8: Detalles de colocación de los transductores emisores y receptores en uno de los pilares. (1), (2), (3) y (6) transductores receptores; (4) Transductor receptor; (5) Depósito que contiene la disolución que acelera la corrosión

En cuanto a los transductores receptores, se han utilizado de dos tipos: 1) Tipo Langevin, idénticos a los emisores y b) transductores de banda ancha Dakel IDK09 [11] con una respuesta en frecuencia plana en un gran ancho de banda que abarca el rango de interés que está por debajo de los 100 kHz

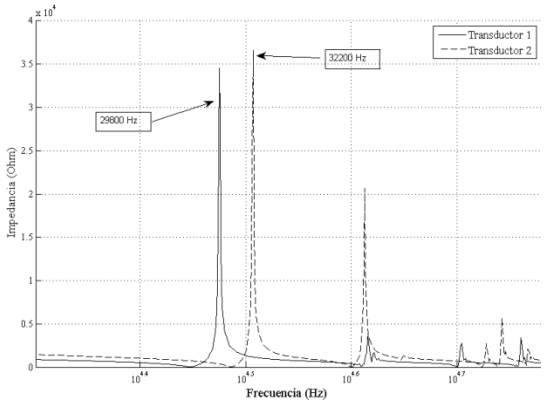



Figura 9: Impedancia eléctrica de los dos transductores tipo Langevin utilizados como emisores. Se aprecia que uno de ellos presenta la resonancia principal a 29800 Hz y el otro en 32200 Hz

El corazón de la configuración experimental es una tarjeta de NI USB-6361 [12] de la que se utilizan una o dos salidas y cuatro entradas activadas, dependiendo del tipo de medida a realizar. Para controlar el proceso de medición se ha desarrollado un programa en Labwiew© cuya pantalla principal se muestra en la figura 9. Como se puede apreciar, es posible seleccionar la frecuencia de emisión, los escalones de la tensión de salida de la tarjeta y otras características de la señal de salida cuya forma también se puede apreciar en la pantalla

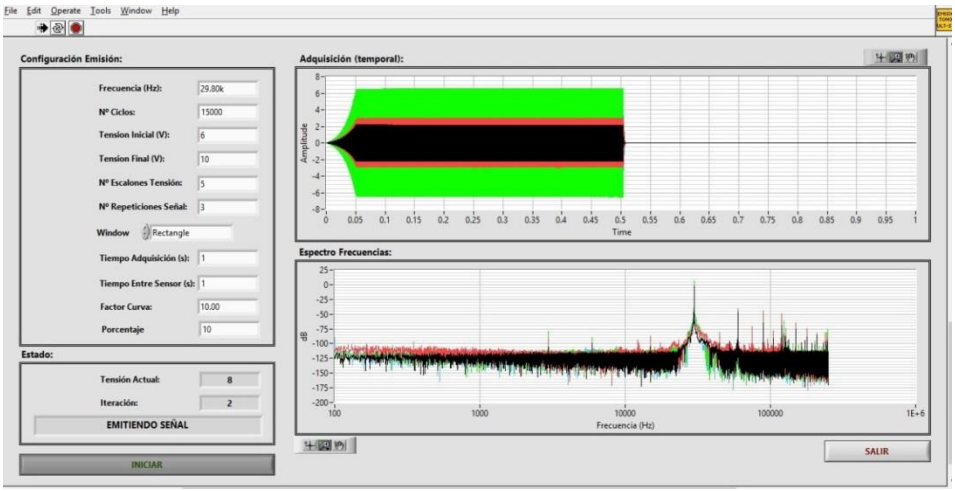



Figura 10: Pantalla principal del programa desarrollado en Labview© con el objeto de controlar la instrumentación en el proceso de medida La parte izquierda está dedicada a la configuración. En la parte superior derecha se visualiza la señal en el tiempo y en la inferior en la frecuencia

Por lo que respecta al ensayo de corrosión, éste se ha llevado a cabo cada vez que se realizaba un ensayo ultrasónico. Los parámetros electroquímicos de seguimiento han sido el potencial y la velocidad de corrosión del acero sin paso de corriente. En las fotografías de la figura 11 se muestra un detalle del proceso de medida




Figura 11: Detalle del proceso de medida de Ecor e Icorr en un pilar (izquierda) y en una viga (derecha)

Los parámetros relativos a la corrosión de las armaduras se midieron mediante un corrosímetro GCOR8 desarrollado por GEOCISA en colaboración con el Instituto Torroja (CSIC). El equipo permite obtener valores de densidad de corriente de corrosión (Icorr) y Potencial de corrosión (Ecorr) a través del método de la Resistencia de Polarización (ASTM C876).
Para llevar a cabo una medida, es necesario descubrir la armadura embebida en el hormigón y limpiar su superficie para eliminar los posibles restos de hormigón u óxido, garantizando así un buen contacto eléctrico. A continuación, se humedece la superficie de hormigón sobre la que se va a medir y se coloca en ella el electrodo de Cu/CuSO4. Se introduce el dato del diámetro del acero en el equipo y éste lleva a cabo la medida. En primer lugar, registra el valor del potencial de corrosión y seguidamente efectúa un barrido en potenciales alrededor de dicho valor. A partir del barrido y mediante el método electroquímico de la resistencia de polarización (RILEM TC 154-EMC), se obtiene el valor de la intensidad de corrosión.

## 3. RESULTADOS

Se muestran a continuación algunos de los resultados más significativos.
En primer lugar, en las figuras 12 (Izquierda y dercha), se compara la respuesta en frecuencia de uno de los transductores tipo Langevin ante la señal de excitación correspondiente al inicio del proceso y al cabo de 15 dias . Se puede apreciar que la amplitud de los armónicos 2º y 3º aumenta y la del primero baja En la figura de la derecha se muestra la evolución de la respuesta en frecuencia de uno de los transductores receptores en forma de espectrograma

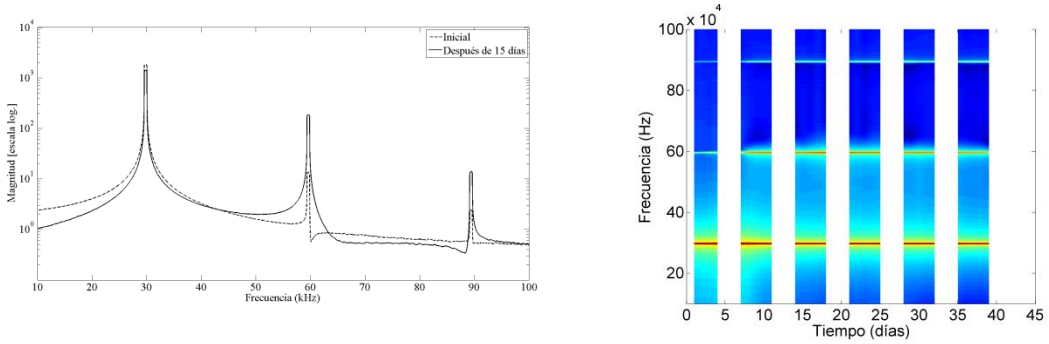



Figura 12: Izda. Respuesta en frecuencia de un transductor tipo Langevin ante la señal de excitación mostrada en la figura . Se puede apreciar que la amplitud de los armónicos 2º y 3º aumenta. Dcha: Evolución de la respuesta en frecuencia de uno de los transductores receptores

En la figura 13 se muestra la evolución temporal del parámetro $A_3 / A_1^3$ (amplitud del tercer armónico respecto a la tercera potencia del fundamental), en función de la potencia de entrada. A partir de la primera semana se puede observar un crecimiento sostenido para cualquier potencia de excitación del transductor. Por tanto, esta proporción aumenta al aumentar la degradación por corrosión del material.

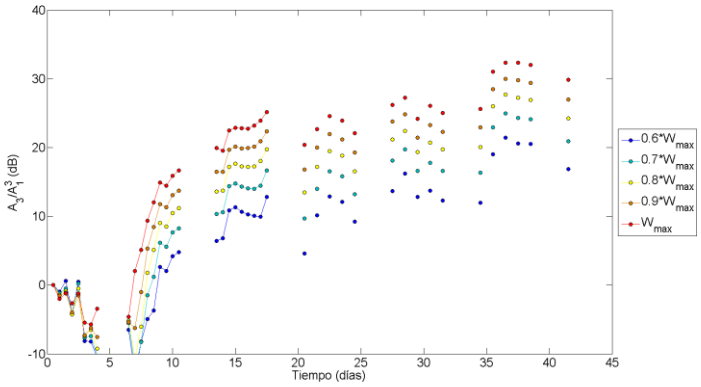



Figura 14: evolución temporal del parámetro (amplitud del tercer armónico respecto a la tercera potencia del fundamental) , en función de la potencia de entrada

Cuando se excitan los dos transductores emisores a la vez, el procesado de los registros permite detectar la presencia de intermodulaciones de primer orden (superior). En la figura 15 se comparan las respuestas en frecuencia del mismo transductor receptor con un desfase temporal de 15 días. Se aprecia un aumento de la amplitud de los armónicos correspondientes a cada transductor y también la amplitud de la señal correspondiente a la frecuencia que es la suma de las fundamentales de excitación, del orden de 62 kHz.

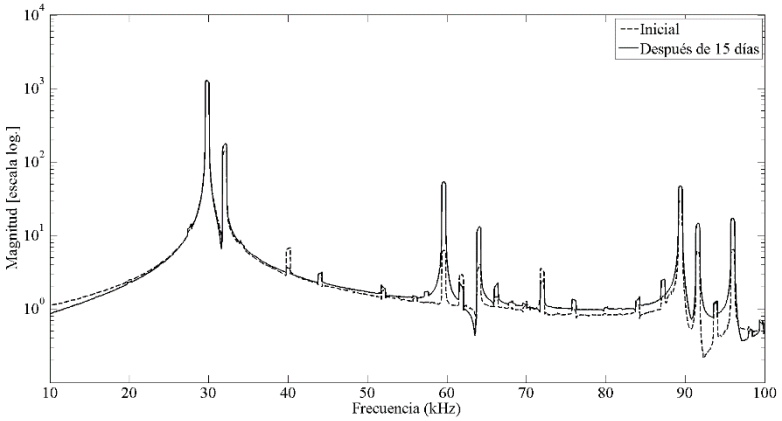



Figura 15: Comparativa de dos registros efectuados con 15 dias de desfase. Se excitan a la vez los dos transdutores emisores

Por lo que respecta a la relación entre las medidas Icor y Ecor con los resultados de las medidas con la técnica propuesta, en las figuras 16 y 17 se ha representado la evolución temporal del parámetro $A_n / A_1^n$ (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro Ecorr

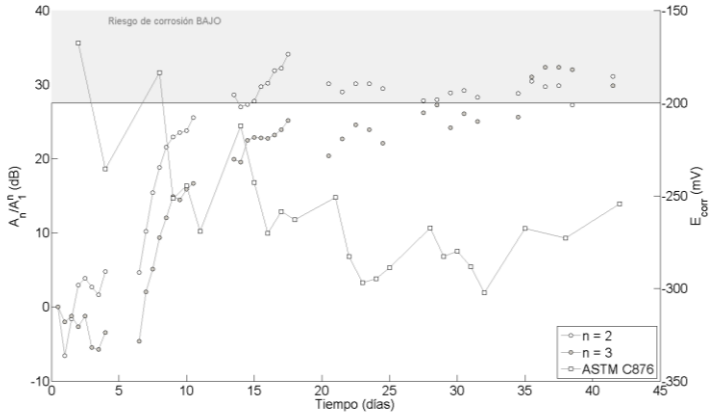



Figura 16: Evolución temporal del parámetro $A_n / A_1^n$ (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro Ecorr

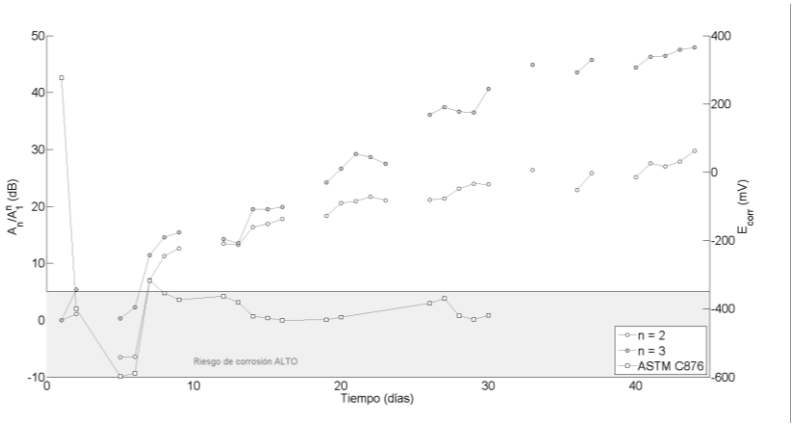



Figura 17: Evolución temporal del parámetro $A_n / A_1^n$ (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro Ecorr

## 4. CONCLUSIONES

Como se ha comentado más arriba, si lo que se busca es una parámetro que mida en sí mismo el posible daño que ha sufrido una estructura por corrosión, esto es, el grado de fisuración interno desarrollado, este no existe tal cual, de ahí la búsqueda de técnicas no destructivas que puedan complementar o mejorar la información que vienen aportando durante años las medidas in situ de *Ecorr* e *Icorr*.
Los resultados obtenidos hasta el momento, algunos de los cuales se han mostrado en las figuras 12 a 17, sin ser definitivos, muestran una correlación y pueden ser los que jueguen el papel complementario buscado.


### Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al soporte del Ministerio de Economía y Competividad a través del proyecto cuya referencia es BIA2013-50297-EXP (*Detección temprana del daño por corrosion en hormigón armado por medio de técnicas ultrasónicas no lineales*)


## REFERENCIAS


[1] M. Pourbaix, Lectures on Electrochemical Corrosion, Plenum Press, New York, London (1973).
[2] M.A. Climent, C. Gutiérrez, Proof by UV-visible modulated reflectance spectroscopy of the breakdown by carbonation of the passivating layer on iron in alkaline solution, Surface Science, 330 (1995) L651-L656.
[3] R.F. Stratfull, The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge, Corrosion, 13 (1957) 43-48.
[4] B. Elsener, H. Böhni, Location of corrosion in reinforced concrete: potential mapping – Possibilities and limitations, Schweizer Ingenieur und Architekt, 105 (1987) 528-533 (en alemán).
[5] M. Stern, A.L. Geary, Electrochemical polarization: a theoretical analysis of the shape of polarization curves, Journal of the Electrochemical Society, 104 (1957) 56.
[6] C. Andrade, J.A. González, Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements, Werkstoffe und Korrosion, 29 (1978) 515-.519.
[7] S. Feliuet Al. Confinement of the electrical signal for in situ measurement of the polarization resístance in reinforced concrete, ACI Materials Journal, 87 (5) (1990) 457-460.
[8] Measurement and Interpretation of the On-site Corrosion Rate, Proceedings of the International Workshop MESINA, Eds. C. Andrade, C. Alonso, J. Fullea, J. Polimon, J. Rodriguez, RILEM Publications, Cachan, France (2000).
[9] M.A. Climent et Al, Measurements of rebar corrosion rates in the concrete structure of a building with 40 years service life in a marine environment, in: C. Andrade, C. Alonso, J. Fullea, J. Polimon, J. Rodriguez (Eds.), Proceedings of the International Workshop MESINA, RILEM Publications, Cachan, France (2000) pp. 109-121.
[10] K.-Y.Jhang,Nonlinear ultrasonic techniques for non- destructive assessment of microdamage inmaterial:a review. Int.J.Precis.Eng.Manuf.10(2009) 123–135.
[11] Dakel. IDK09. (s.f.). Consultado en septiembre de 2015 en www.dakel.cz.
[12] National Instruments. USB-6361. (2015). Consultado en septiembre de 2015 en spain.ni.com.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# USO DE ULTRASONIDOS DE SEÑAL PARA LA DETECCIÓN DEL DEFECTO DE PASTOSIDAD EN JAMÓN CURADO

PACS: 43.35.+d

Martinez-Escriva, G., Cervera, C., Mora, M.E., Benedito, J., Garcia-Perez, J.V.
Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios
Departamento de Tecnología de Alimentos
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
E46022 Valencia. España
E-mails: gemares@etsia.upv.es, carcerpe@etsiamn.upv.es, mamorui1@etsiamn.upv.es, jjbenedi@tal.upv.es, jogarpe4@tal.upv.es

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the feasibility of low-intensity ultrasound as a means of non-destructive characterization of ham pastiness, which is a kind of defective texture. In order to achieve this objective, ultrasonic measurements by pulse-echo and through-transmission methods were carried out in dry-cured ham pieces and slices at different temperatures (from 4 to 22ºC) and ultrasonic velocity and attenuation coefficient were assessed and compared with instrumental texture and sensory parameters. A satisfactory correlation between ultrasonic velocity and textural parameters (hardness and relaxation capacity) was found. However, neither ultrasonic velocity nor textural parameters showed any relevant correlation with sensory assessment of pastiness.

## RESUMEN

Este trabajo pretende evaluar el potencial de los ultrasonidos de señal para caracterizar de manera no-destructiva del defecto de pastosidad en jamón. Para alcanzar este objetivo, se realizaron medidas en transmisión-recepción y pulso-eco en jamones enteros y lonchas a diferentes temperaturas (4-22 ºC) y se analizó la velocidad ultrasónica y atenuación. Los resultados experimentales pusieron de manifiesto que existió una buena correlación entre la velocidad ultrasónica y los parámetros texturales (dureza y capacidad de relajación). Sin embargo, ni la velocidad ultrasónica ni los parámetros texturales mostraron correlaciones significativas con la medida sensorial de la pastosidad.

## INTRODUCCION

La reducción del contenido de sal en jamón curado debido a los nuevos gustos del consumidor está provocando un incremento del número de jamones con texturas defectuosas. Uno de los principales defectos de textura es la pastosidad, caracterizado por una pérdida de elasticidad del músculo como consecuencia de una elevada actividad proteolítica [1,2]. El defecto de

pastosidad no solo disminuye la calidad organoléptica del jamón curado sino que también ocasiona una merma importante en el loncheado y provoca un alto grado de adhesividad entre las lochas.
Generalmente, la determinación de textura se realiza mediante análisis instrumental y sensorial [3]. Este tipo de métodos son de difícil aplicación en la industria en vistas a la automatización de los procesos ya que son lentos y destructivos. Así, existe un elevado interés en la industria por la búsqueda de métodos no-destructivos y no-invasivos que faciliten el control de calidad en línea de alimentos, como son los ultrasonidos de señal. La utilización de estas técnicas es especialmente compleja en productos que presentan elevada heterogeneidad como es el jamón curado. Así, el presente trabajo pretende determinar la viabilidad de los ultrasonidos de señal como tecnología no destructiva para caracterizar y cuantificar el defecto de pastosidad en jamón curado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia prima

En el presente estudio, se utilizaron porciones de la maza de jamones curados, provenientes de cerdos blancos, con (P) y sin (NP) el defecto de pastosidad. Además, se realizaron experiencias en lochas de jamón curado loncheado (15-20 mm) en las que se separaron los músculos *Semimembranosus* (SM) y *Biceps femoris* (BF). En todos los casos, las muestras se envasaron a vacío para la realización de las medidas ultrasónicas.

### Medidas ultrasónicas

Previamente a la realización de las medidas ultrasónicas en las porciones y lonchas de jamón curado, se localizaron las zonas de medida, coincidentes con la superficie de los transductores utilizados (1''diametro). Las zonas de medida pretenden ocupar la mayor parte de la superficie de los paquetes con el objetivo de alcanzar una buena caracterización de la muestra (Figura 1).



*Figura 1. Localización de las zonas de medida en una porción de la maza del jamón.*

Se realizaron medidas ultrasónicas en modo transmisión-recepción y pulso-eco, utilizando el montaje experimental mostrado en la Figura 2, empleando las siguientes condiciones:

- Transductor ultrasónico: 1 Mhz y 5 MHz de banda estrecha (A314S) y de 1 MHz de banda ancha (V314S) (Panametrics).
- Temperatura de medida: 2 - 7 - 15 - 22ºC.

A partir de la señal ultrasónica digitalizada y almacenada en un PC, se determinó la velocidad ultrasónica mediante el método del umbral de energía y se realizó la transformada rápida de Fourier (FFT) para el análisis del espectro de frecuencias en dos frentes de llegada

consecutivos de la onda (Figura 3). A partir de la FFT, se determinó el coeficiente de atenuación y otros parámetros característicos como: frecuencia del pico, área, asimetría y curtosis del espectro.

**Análisis de textura instrumental**

Finalizadas las medidas ultrasónicas, se realizaron ensayos de compresión-relajación, de acuerdo al procedimiento descrito por Morales et al. (2007) [3] con el objetivo de determinar tanto la dureza (F0) como la capacidad de relajación (Y90, Ec. 1) de las muestras. En el ensayo, se utilizó una sonda cilíndrica de 5 cm de diámetro, las muetras se comprimieron hasta un 25% de su altura, a una velocidad de compresión de 1 mm/s y manteniendo la posición durante 90 s para estudiar la relajación de la muestra (Figura 4). Los ensayos de textura se realizaron a 2 ºC. En el caso de las piezas enteras los ensayos se hicieron en cilindros de 2 cm de altura tomados de las zonas de medida con un sacabocados (1'' de diámetro) y en las lonchas de los músculos SM y BF con paralelepípedos de 2.0x2.0x1.5 cm.

$$Y(90) = \frac{F(0) - F(90)}{F(0)} \qquad \text{Ec. (1)}$$

Donde: F(0) hace referencia al comienzo del periodo de relajación (0s) y F(90) a los 90 s de comenzar relajación.

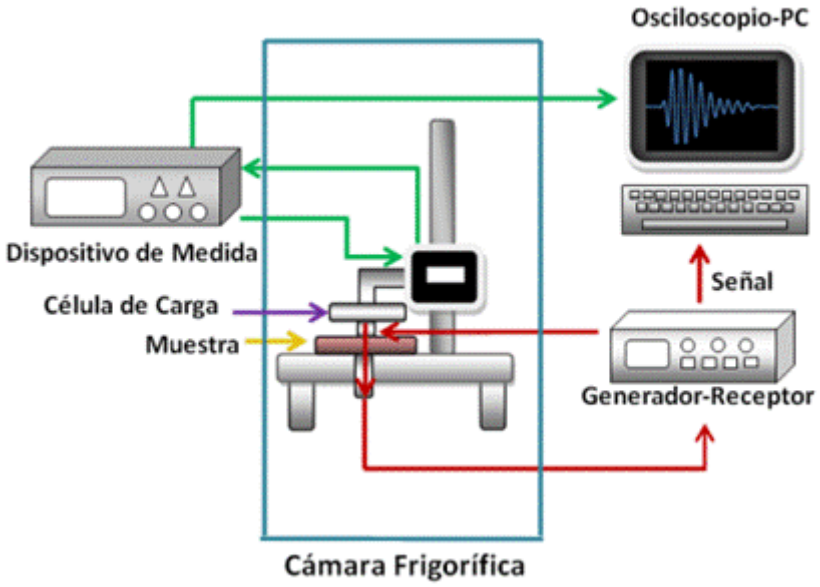



*Figura 2. Esquema del sistema ultrasónico.*

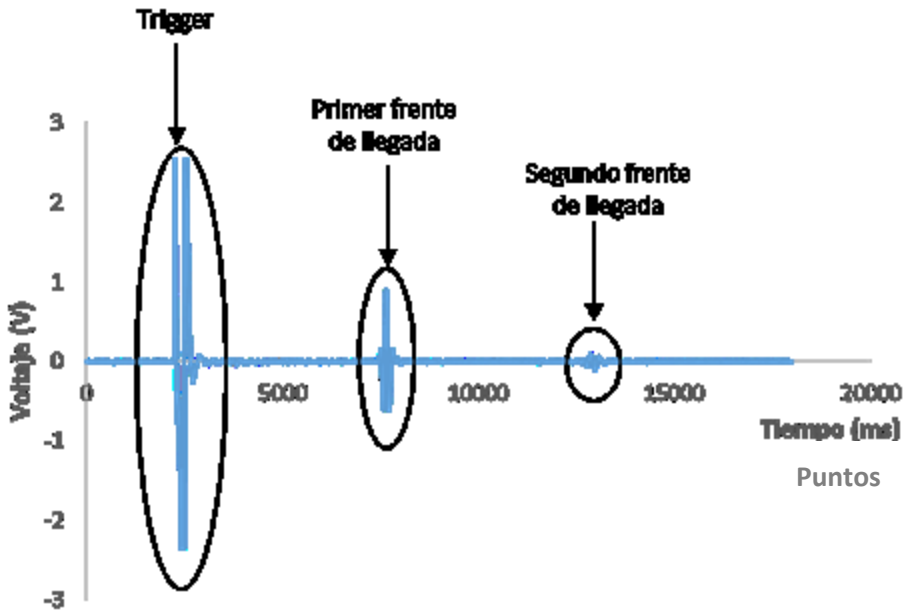



*Figura 3. Señal de atenuación ultrasónica sobre la que se realiza la transformada rápida de Fourier.*

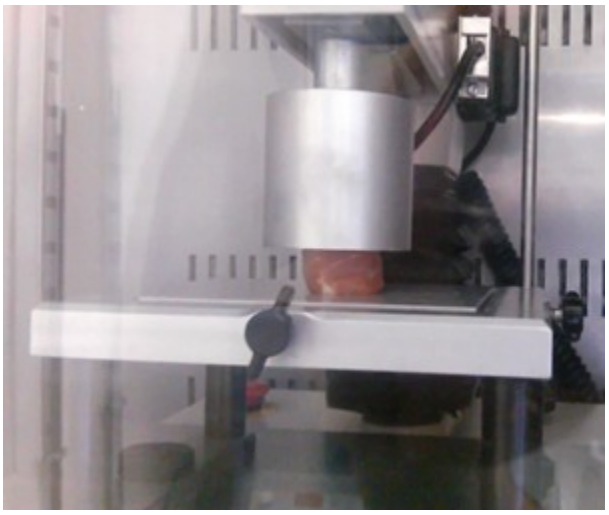


*Figura 4. Ensayo de compresión/relajación en cilindros de 2 cm de altura.*

**Análisis sensorial**

Un panel de catadores entrenados pertenecientes al IRTA (Monells, Girona) determinó el grado de intensidad en los defectos de pastosidad y adhesividad en las lonchas de los músculos BF y SM. El análisis se realizó con lonchas de 1 mm de espesor y se valoraron los atributos de pastosidad y adhesividad puntuando las muestras de 0 a 5 (intervalos de 0.5) siendo 0 poco adhesivo/pastoso y 5 mucho.

**Determinación de humedad y grasa**

La determinación de humedad y grasa se realizó siguiendo los métodos de la AOAC 950.46 y AOAC 991.36, respectivamente [4].

## RESULTADOS Y DISCUSION

En todas las muestras, se observó un descenso de la velocidad ultrasónica al incrementar la temperatura de medida como consecuencia de la fusión de las grasas y por tanto, la reducción del ratio sólido/líquido (Figura 5) [5]. La medida de la velocidad ultrasónica fue factible con los transductores de 1 y 5 MHz, sin embargo, no se pudo medir el coeficiente de atenuación con los transductores de 5 MHz en las piezas de jamón. Las medidas de velocidad ultrasónica permitieron a su vez diferenciar entre los músculos SM y BF (Figura 5).

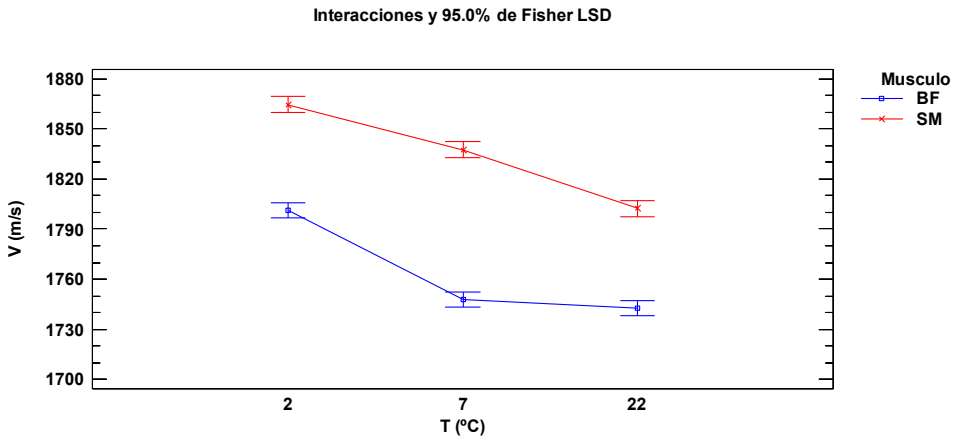
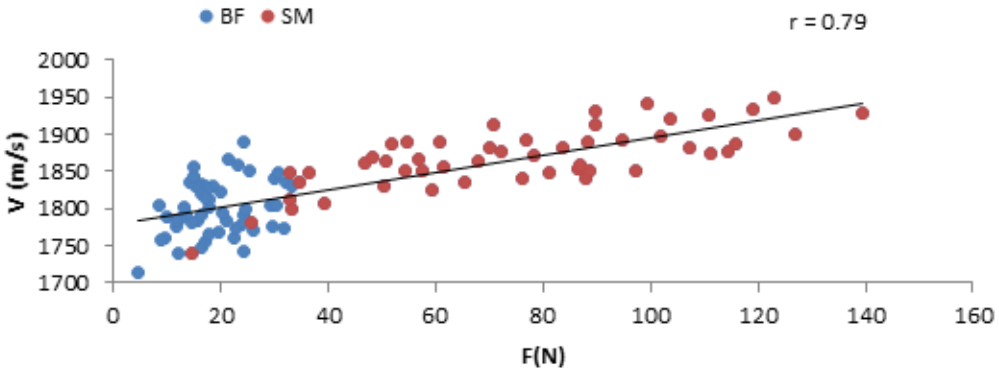



*Figura 5. Influencia de la temperatura (T) y el tipo de músculo (BF = Biceps femoris, SM = Semimembranosus) sobre la velocidad ultrasónica (V) en lonchas de jamón curado.*

Se obtuvieron correlaciones significativas entre la velocidad ultrasónica y la dureza y capacidad de relajación tal y como se muestra en la Figura 6, donde se observa que a medida que aumenta la dureza aumenta la velocidad ultrasónica. Mientras que en el caso de la capacidad de relajación se observa el comportamiento contrario, es decir a medida que aumenta la capacidad de relajación disminuye la velocidad ultrasónica (Figura 6). En las medidas realizadas en los músculos SM y BF del jamón curado loncheado, no se observó relación alguna entre los parámetros texturales y el coeficiente de atenuación.



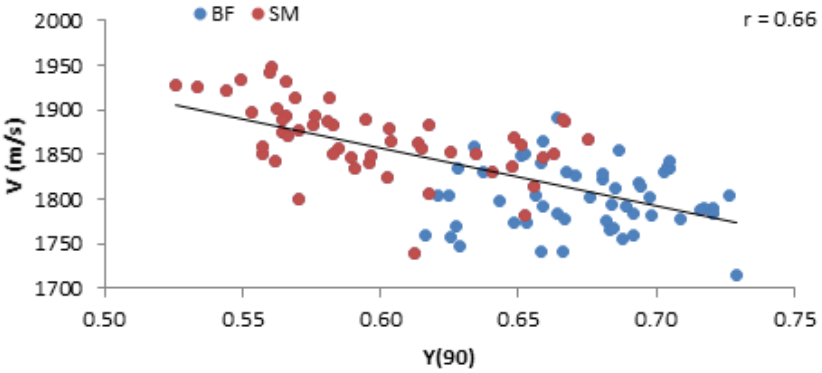



*Figura 6. Relación entre la velocidad ultrasónica (v) y los parámetros de textura: F(0)=Fuerza máxima e Y(90)=Capacidad de relajación, según el tipo de músculo (BF = Biceps femoris, SM = Semimembranosus).*

En piezas enteras de la maza, tanto las medidas de atenuación como de velocidad permitieron caracterizar el defecto de pastosidad ya que los jamones pastosos presentaron mayores velocidades (Figura 7) y coeficientes de atenuación que los no pastosos. Sin embargo, en el jamón loncheado, la correlación entre pastosidad sensorial y la velocidad o atenuación ultrasónica no fue satisfactoria (Figura 8). Este hecho podría deberse a que en el caso de las piezas enteras de jamón, la medida ultrasónica se realiza en dirección perpendicular a las fibras, mientras que en las lochas, la propagación de la onda es en el mismo sentido de las fibras. Del mismo modo, los parámetros texturales tampoco se relacionaron con la medida sensorial de pastosidad.

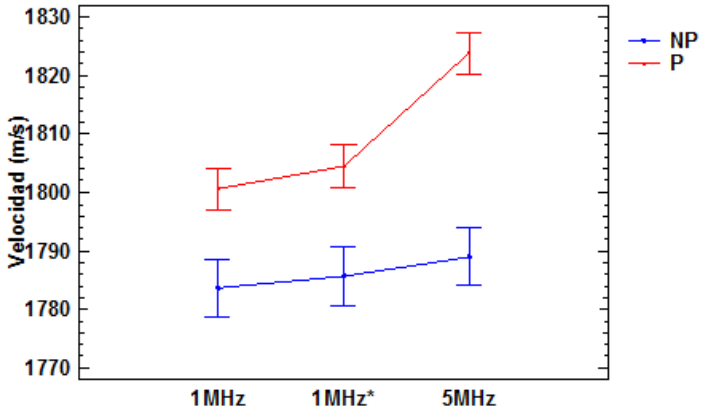



*Figura 7. Valores medios e intervalos LSD (95%) de la velocidad ultrasónica (m/s) para jamones Pastosos y No Pastosos determinados a 22ºC utilizando tres transductores (1 MHz y 5 MHz de banda estrecha y 1 MHz de banda ancha).*

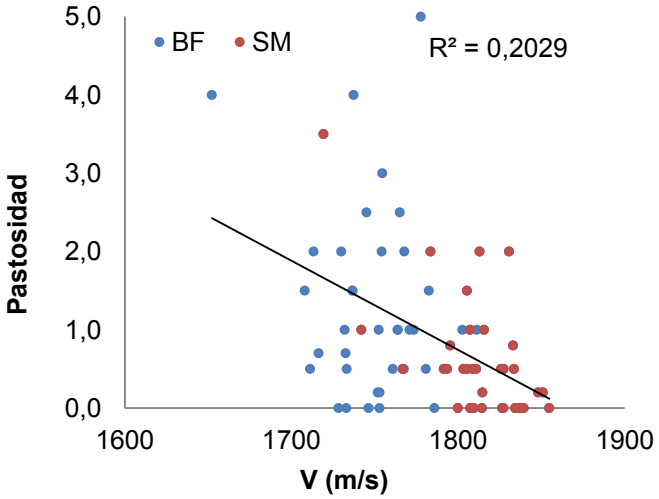



*Figura 8. Relación de la velocidad ultrasónica (V) medida a 4ºC con los parámetros sensoriales (Pastosidad y adhesividad) para lonchas de jamón curado loncheado del músculo (BF = Biceps femoris, SM = Semimembranosus).*

## CONCLUSIONES

La aplicación de ultrasonidos de potencia puede considerarse una tecnología con alto potencial para ser empleada en la caracterización de parámetros texturales en jamón curado (piezas enteras y lonchas) con y sin el defecto de pastosidad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al INIA, MINECO y el programa FEDER la financiación a través del proyecto: RTA2013-00030-C03-02.

## REFERENCIAS

1. Gou, P., Morales, R., Serra, X., Guàrdia, M. D., Arnau, J. (2008). Effect of a 10-day ageing at 30 C on the texture of dry-cured hams processed at temperatures up to 18 C in relation to raw meat pH and salting time. Meat science, 80, 1333-1339.
2. Morales, R., Arnau, J., Serra, X., Guerrero, L., Gou, P. (2008). Texture changes in dry-cured ham pieces by mild thermal treatments at the end of the drying process. Meat Science, 80, 231-238.
3. Morales, R., Guerrero, L., Serra, X., Gou, P. (2007). Instrumental evaluation of defective texture in dry-cured hams. Meat Science, 76, 536–542.
4. AOAC (1997). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemist, Arlington, Virginia, EEUU.
5. Corona, E., García-Pérez, J.V., Mulet, A., Benedito, J. (2013). Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage. Meat Science, 95, 389-395.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MEJORA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO MODERADO EN JAMÓN CURADO MEDIANTE ULTRASONIDOS DE POTENCIA

PACS: 43.35.

Martinez-Escriva, G., Portilla, I., Navarro-Cabo, A., Bon, J., Benedito, J., Garcia-Perez, J.V.
Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios
Departamento de Tecnología de Alimentos
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n, Valencia E46022, España;
gemares@etsia.upv.es, ivporpe@etsiamn.upv.es, alnaca2@etsiamn.upv.es, jbon@tal.upv.es, jjbenedi@tal.upv.es, jogarpe4@tal.upv.es;

## ABSTRACT

The aim of this work was to assess the kinetic improvement linked to the application of power ultrasound (PuS) in the mild thermal treatment of sliced dry-cured ham. For this purpose, dry-cured ham slices (thickness 2 cm) were water-heated at different temperatures (40, 45, 50 ºC) using an ultrasonic bath (21 kHz). The evolution of temperature in different points of the slice was monitored. Thus, an increase of the thermal diffusivity of up to 55% was observed when PuS was applied. However, the improvement of transport phenomena by PuS application was reduced by the temperature increase.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar la mejora cinética que conlleva la aplicación de ultrasonidos de potencia (UdP) en el tratamiento térmico moderado de jamón loncheado. Para alcanzar este objetivo, lonchas de jamón de 2 cm de espesor se calentaron en agua a diferente temperatura (40, 45, 50 ºC) utilizando un baño ultrasónico (21 kHz). Se monitorizó la evolución de la temperatura en diferentes puntos de la loncha. Se observó un incremento de la difusividad térmica de hasta un 55% cuando se aplicaron UdP. Sin embargo, la mejora de los fenómenos de transporte por la aplicación de UdP disminuyó al aumentar la temperatura.

## INTRODUCCION

La reducción del contenido de sal en jamón curado debido a los nuevos gustos del consumidor está provocando un incremento del número de jamones con texturas defectuosas. Uno de los principales defectos de textura es la pastosidad, caracterizado por una pérdida de elasticidad del músculo como consecuencia de una elevada actividad proteolítica. El defecto de pastosidad no solo disminuye la calidad organoléptica del jamón curado sino que también ocasiona una merma importante en el loncheado y provoca un alto grado de adhesividad entre las lochas.

La bibliografía previa ha puesto de manifiesto que un calentamiento moderado del jamón al final de su procesado puede conllevar una reducción relevante del defecto de pastosidad [1-2]. En vistas a una posible aplicación industrial, parece tener un mayor interés la realización de dichos tratamientos con producto loncheado que con jamones enteros en vistas a acelerar el proceso de calentamiento. Del mismo modo, la búsqueda de nuevas tecnologías para acelerar el tratamiento térmico es de elevado interés. Así, el presente trabajo pretende determinar la viabilidad de la aplicación de ultrasonidos de potencia (UdP) en medio líquido para acelerar el tratamiento térmico moderado de jamón curado loncheado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Tratamiento térmico de jamón curado loncheado

En el presente estudio, se utilizaron lonchas de jamón curado adquiridas en un supermercado local, de 2 cm de espesor, y siempre tomadas de la parte central del jamón. Las piezas se envasaron al vacío con el objetivo de evitar el contacto con el agua durante el tratamiento y se mantuvieron en refrigeración hasta la realización de los tratamientos. Se estudió el comportamiento del músculo *Semimembranosus* (SM).

En el músculo SM, se colocaron dos termopares tipo T de clase 1 (alta precisión) de un diámetro de 0,5 mm colocadas dentro de una aguja hipodérmica para facilitar su penetración en la muestra. Uno de los sensores se colocó en el centro (x=0) de la loncha y otro en el punto medio entre el centro y la superficie (x=0,5). Además, se colocaron termopares tipo K en la superficie de la loncha y en el agua Durante las experiencias, se realizaron lecturas cada 20 segundos de los distintos termopares (34970A, Agilent, USA).

El tratamiento térmico se realizó en un baño de ultrasonidos de acero inoxidable de 15 L (ATG15160, ATU, España) (Figura 1) dotado de un sistema de control ON-OFF de temperatura basado en la recirculación del agua del baño y utilización de un equipo de refrigeración externo. En las experiencias donde se aplicaron UdP, se suministraron 600 W a los transductores ultrasónicos mientras que en las experiencias sin aplicación de UdP se introdujo un agitador (D91126, Heidolph Instruments, Alemania) de tipo hélice a 360 rpm con el objetivo de aumentar la turbulencia en el baño y así homogeneizar su temperatura.

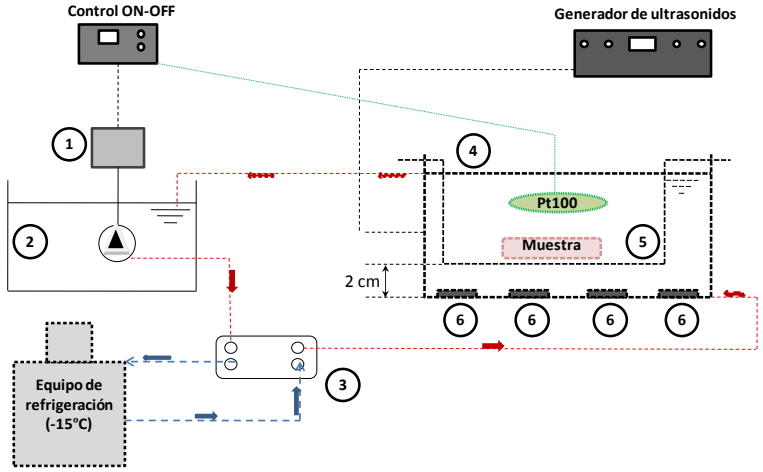



*Figura 1. Montaje experimental utilizado para la realización del tratamiento térmico. 1: Bomba y agitador. 2: Depósito pulmón. 3: Intercambiador de calor. 4: Baño de ultrasonidos. 5: Cesta porta muestras. 6: Transductores ultrasónicos.*

Se realizaron tratamientos térmicos de las lonchas de jamón a diferentes temperaturas del agua del baño (40ºC, 45ºC y 50ºC) con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos de potencia. Las experiencias finalizaron cuando la diferencia de temperaturas entre el punto más

frío de la loncha (x=0) y el agua del baño era igual o inferior a 5ºC. En todos los casos, se realizaron 3 réplicas para cada condición experimental ensayada.

**Modelización del proceso de calentamiento**

Con el objetivo de poder predecir la temperatura en los diferentes puntos de la loncha de jamón a lo largo del tiempo de calentamiento, se aplicó un modelo que consideró que la transferencia de calor fue únicamente controlada por la conducción, basado en la Ley de Fourier [3]. Se supuso que el material era isótropo y homogéneo, la difusividad térmica constante, y se consideró la loncha de jamón como una lámina infinita (espesor 2L = 2 cm) a efectos de transferencia de calor, debido a que el área de las caras planas es muy superior al área de la superficie perimetral.

$$\frac{T\,(x,t)-T_\infty}{T_o-T_\infty} = 2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{\beta_n\,L}\,e^{-\alpha\,{\beta_n}^2 t}\,cos\,(\beta n\,x) \qquad \text{Ec. 1}$$

Dónde: x es la posición (m), $t$ el tiempo (s), $T$ es la temperatura (ºC) y $\alpha$ la difusividad térmica ($m^2/s$), ∞ hace referencia a la temperatura del baño, To la temperatura inicial de la muestra, L es el semi espesor de la muestra y $\beta_n$ es un valor característico [3].

El modelo de transferencia de calor se ajustó a las cinéticas de calentamiento planteando un problema de optimización a partir del cual se identificó la difusividad térmica que minimizó la suma de los errores cuadráticos entre la temperatura experimental y la calculada. La bondad del ajuste se evaluó determinando los errores medios relativos y comparando los valores experimentales y calculados.

**RESULTADOS Y DISCUSION**

En la Figura 2 se muestra las cinéticas de calentamiento en el centro de las lonchas de jamón (x=0) a diferentes temperaturas con (US) y sin (SUS) la aplicación de ultrasonidos de potencia. Para todas las temperaturas se observa un incremento de la velocidad de calentamiento en las experiencias US. Así, a 40ºC, el tiempo de calentamiento para las experiencias SUS fue de 16±2 min, mientras que en las experiencias US se redujo a 10±1 min, lo que representa una reducción del 31%.

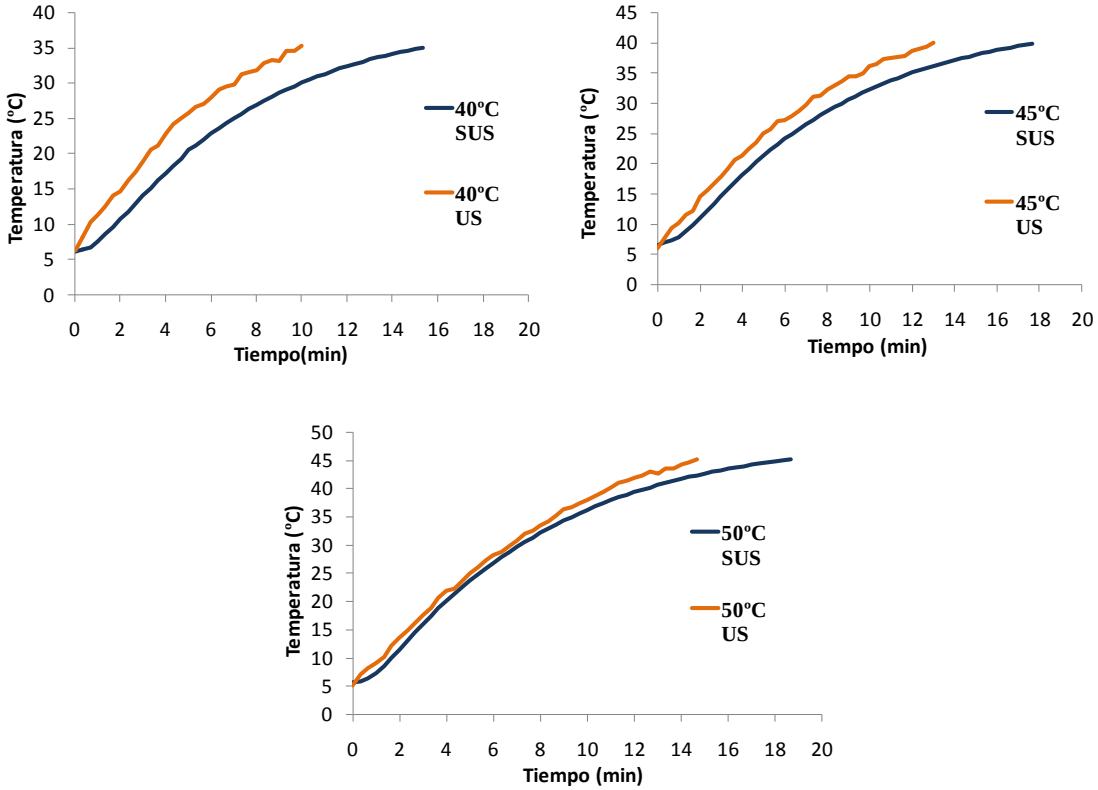



*Figura 2. Cinéticas de calentamiento en el centro de la loncha (x=0) de jamón curado (L=1 cm) a diferentes temperaturas del baño (40,45 y 50 ºC), con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos de potencia.*

Las diferencias observadas debido a la aplicación de ultrasonidos de potencia no incluyen el calentamiento asociado a la cavitación en el agua ya que el sistema de control de temperatura permitió un adecuado control de la temperatura del baño (Figura 3) durante las experiencias. Así, la mejora de la velocidad de calentamiento debe asociarse a los efectos de los UdP en la resistencia externa e interna a la transferencia de calor y no a un incremento del gradiente de temperaturas. En caso de no realizarse un adecuado control de la temperatura, las diferencias entre las experiencias SUS y US serían mayores.

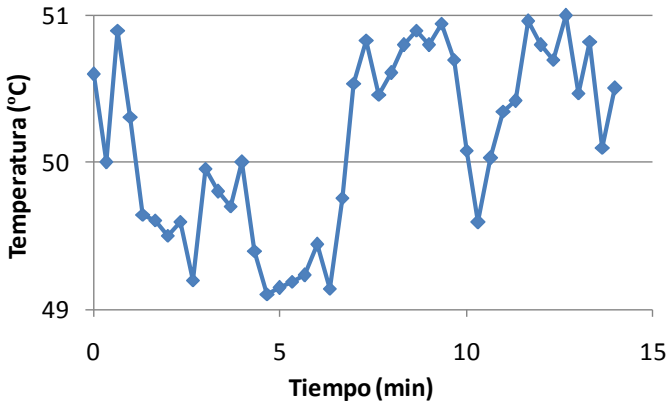



*Figura 3. Evolución de la temperatura en el baño durante una experiencia con aplicación de ultrasonidos a 50ºC.*

En las cinéticas de calentamiento US se observan inestabilidades en los valores de temperatura que podrían ser consecuencia de los efectos mecánicos (compresiones y descompresiones) que los UdP provocan en el interior del producto e incluso a la aparición de fenómenos de cavitación en la fracción de agua libre del producto [4].

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la modelización de las cinéticas de calentamiento en las experiencias SUS y US. El modelo utilizado proporcionó un ajuste satisfactorio de las cinéticas de calentamiento con coeficientes de regresión entre 0.98 y 0.99 y errores medios relativos inferiores al 5%. Esto indica que las hipótesis consideradas en la formulación del modelo son adecuadas por lo que el calentamiento puede considerarse controlado por la conducción tanto en las experiencias SUS como US.

*Tabla 1. Resultados de la modelización de las cinéticas de calentamiento en el centro de la loncha (x=0) para las experiencias con (US) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos (UdP). Difusividad térmica ($\alpha$) y parámetros estadísticos: coeficiente de correlación ($R^2$) y error medio relativo (EMR).*

| $T$ (ºC) | SUS | | | US | | | $\Delta\alpha$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\alpha$ ($10^{-7}$ $m^2/s$) | $R^2$ | EMR (%) | $\alpha$ ($10^{-7}$ $m^2/s$) | $R^2$ | EMR (%) | |
| **40** | 0.98 | 0.99 | 4.08 | 1.35 | 0.99 | 3.98 | 38 |
| **45** | 1.23 | 0.99 | 2.28 | 1.41 | 0.98 | 2.09 | 15 |
| **50** | 1.01 | 0.98 | 5.21 | 1.10 | 0.99 | 4.67 | 14 |

*$\Delta\alpha$ hace referencia al incremento de la difusividad térmica por la aplicación de ultrasonidos de potencia.*

La aplicación de UdP conllevó un incremento significativo de la difusividad térmica para todas las temperaturas. El mayor incremento se observó para las experiencias a 40ºC (38%) y se observó un descenso del mismo a medida que se incrementó la temperatura (Tabla 1). Este hecho indica que los UdP son más eficientes en procesos de baja que de alta temperatura, lo cual se ha observado en otras aplicaciones en procesos agroalimentarios [5].

## CONCLUSIONES

La aplicación de ultrasonidos de potencia puede considerarse una tecnología con alto potencial para ser aplicada en la mejora del calentamiento a temperaturas moderadas de jamón curado con el fin de reducir el tiempo de procesado. En trabajos posteriores debe abordarse si la aplicación de ultrasonidos de potencia también provoca modificaciones adicionales en la estructura del producto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al INIA, MINECO y al programa FEDER la financiación a través del proyecto: RTA2013-00030-C03-02.

## REFERENCIAS

1. Gou, P., Morales, R., Serra, X., Guàrdia, M. D., Arnau, J. (2008). Effect of a 10-day ageing at 30 C on the texture of dry-cured hams processed at temperatures up to 18 C in relation to raw meat pH and salting time. Meat Science, 80, 1333-1339.
2. Morales, R., Arnau, J., Serra, X., Guerrero, L., Gou, P. (2008). Texture changes in dry-cured ham pieces by mild thermal treatments at the end of the drying process. Meat Science, 80, 231-238.
3. Mulet, T., Bon, J. (2001). Transferencia de calor por conducción en ingeniería de alimentos. Servicio de publicaciones de la Universitat Politècnica de València. SPUV-369. Valencia.
4. Gallego-Juárez, J. A, Graff, .F.K. (2015). Power ultrasonics. Applications of High-intensity ultrasound. Ed: Woodhead Publishing.
5. García-Pérez, J.V. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# REFLEXIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS POR CRISTALES DE SONIDO: APLICACIÓN AL RUIDO EN LANZAMIENTO DE COHETES ESPACIALES

PACS: 43.35.Bf

L.J. Salmerón-Contreras[1], A. Cebrecos[2,3], N. Jiménez[2,3], L.M. García-Raffi[1], R. Picó[2], J. Redondo[2], V. Romero-García[3], V.J. Sánchez-Morcillo[2] y K. Staliunas[4]
[1]Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n. 46022 València. E-mail: luisalco@epsg.upv.es,
[2]Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València – Campus de Gandia. Paraninf 1, 46730, Grao de Gandia, València.
[3]L'Université Nantes Angers Le Mans, Université du Maine. CNRS LAUM UMR 6613, Av. O. Messieaen, 72085 Le Mans, France.
[4]ICREA, Departament de Física i Enginyeria Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya. Colom 11, E-08222 Terrasa, Barcelona.

## ABSTRACT

In this work we present the experimental results of dispersion of acoustic waves by sonic crystals –periodic distribution of scatters embedded on a fluid witch present high-contrast physical properties-. We analyzed the distribution of reflected intensity in far field and near field when an ultrasonic beam impinges on a sonic crystal in different configurations, where sonic crystals are located on a duct. The main target is to apply those ideas to the intense acoustic field generated by the launch of the VEGA rocket in a project with European Space Agency.

## RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados experimentales de la dispersión de las ondas acústicas en los cristales de sonido -distribución periódica de dispersores en un fluido frente al cual presentan un fuerte contraste de las propiedades físicas-. Analizamos la distribución de la intensidad reflejada en campo lejano y cercano, cuando una haz ultrasónico incide sobre un cristal de sonido emplazado en diferentes configuraciones, donde los cristales se colocan sobre un canal. El objetivo es aplicar estas ideas al campo acústico intenso que se genera en el despegue del cohete VEGA. Este trabajo se enmarca en el contexto de un proyecto Innovation Triangle Initiative (ITI) con la Agencia Espacial Europea.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cristales de sonido son sistemas pasivos que se pueden utilizar para el control de la propagación de ondas acústicas. En general, están formados por una distribución **periódica** de un elemento dispersor en un medio homogéneo fluido. Por ejemplo, un cristal de sonido clásico, periódico en dos dimensiones, es un conjunto de cilindros (metálicos) ordenados en un fluido (por ejemplo, aire) formando una malla cuadrada (véasela Fig. 1). La diferencia entre las propiedades físicas de los distintos dispersores y el medio huésped provoca numerosas reflexiones de la onda acústica. Por otra parte, la geometría del dispersor y su distribución en el medio, se pueden diseñar de tal manera que el campo acústico presente propiedades interesantes al interaccionar con esta clase de sistemas.

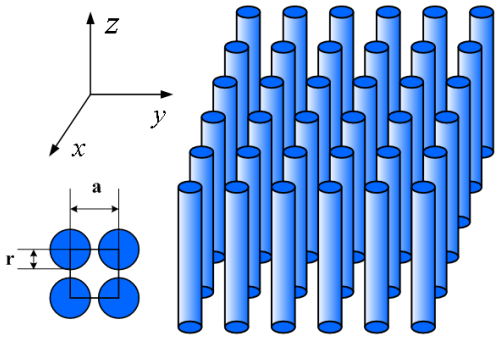



**Fig. 1.** Cristal de sonido con periodicidad en x e y, formado por dispersores cilíndricos dispuestos en una malla rectangular.

Dentro de estos efectos, uno destacable debido a la modulación periódica de las propiedades acústicas a lo largo del conjunto, es la presencia de rangos de frecuencia para los cuales las ondas no se pueden transmitir a través de él, ya que son evanescentes. En analogía con los sólidos cristalinos, a estos rangos de frecuencia se les denomina en la literatura bandas prohibidas ("**band gap**" en inglés) y es un fenómeno que depende de la dirección de incidencia de las ondas, tratándose de una banda prohibida completa ("full band gap") si el fenómeno sucede para cualquier ángulo de incidencia. Esta propiedad, permite el diseño y concepción de un cristal de sonido como un dispositivo pasivo capaz de actuar como filtro frecuencial, y que ha sido utilizado, por ejemplo, para la fabricación de pantallas acústicas [1,2]. Para rangos de frecuencia para los cuales la longitud de onda es mayor que la periodicidad del cristal, la onda se propaga a través de éste como si fuera un medio con propiedades acústicas efectivas (régimen de homogeneización), que son en función de las propiedades de los dispersores y el medio huésped. Además, se pueden diseñar dispositivos basados en cristales de sonido que, según el rango de frecuencias considerado, sean capaces de colimar, focalizar o filtrar espacialmente el haz acústico, diseñar guías de onda, existiendo una amplia literatura al respecto. En particular, en este trabajo, hemos tomado como referencia aquellos que están dedicados a la reflexión y dispersión de ondas acústicas por cristales de sonido [3,4,5].

Estas propiedades son bien conocidas cuando se refieren a la transmisión, sin embargo, los aspectos relativos a la reflexión de las ondas sonoras por cristales, y en particular la distribución espacial del campo reflejado, han sido mucho menos estudiados. El estudio de la reflexión por cristales abre un amplio campo de posibles aplicaciones relacionadas con el control de la reflexión del sonido. En este trabajo, el estudio de las propiedades del campo reflejado por un cristal se ha planteado con el objetivo adicional de reducir el nivel de ruido reflejado especularmente, en un contexto muy particular: el despegue de cohetes espaciales. Se trata de uno de los eventos sonoros más extremos entre los creados por el ser humano, llegando a alcanzarse intensidades próximas a los 200 dB. Esto sucede principalmente durante la fase de ignición y despegue, en la que es necesaria una gran cantidad de energía de propulsión para poner la nave en órbita. Este ruido generado experimenta la reflexión sobre la

base de despegue (launchpad), situada a pocos metros de las fuentes sonoras (los motores), tras la cual regresa a la nave antes de que ésta haya despegado, provocando fuertes vibraciones que pueden dañar la carga que se desea poner en órbita, habitualmente satélites (véase Fig. 2). Entre las alternativas para reducir este impacto, una posibilidad sería actuar sobre la fuente que lo genera, y otra actuar sobre la onda generada. La estrategia propuesta aquí se basa en la actuación sobre el ruido reflejado que posteriormente impacta sobre la aeronave. Las condiciones del problema imponen numerosas restricciones. Además de ser un evento sonoro extremo, el despegue viene acompañado por la generación de flujos de gases a muy alta temperatura, por lo que, el sistema empleado debe caracterizarse por ser permeable a los gases y capaz de resistir ambientes térmicos y dinámicos de alta intensidad. Por esta razón, la dispersión acústica que producen los cristales de sonido, junto con la resistencia de sus elementos dispersores (por lo general, lleva asociada una alta impedancia acústica) y la separación entre éstos (que permite el flujo de gases), hace de este elemento un candidato para esta aplicación.

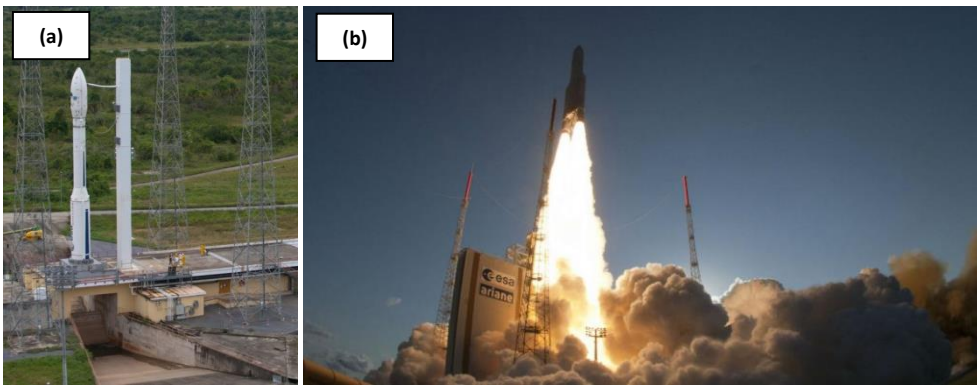



**Fig. 2. (a)** Detalle de la plataforma de despegue del cohete VEGA.
**(b)** Instantánea durante la fase de despegue del cohete ARIANE 5.

El objetivo de este trabajo es analizar la reflexión de ondas sonoras por cristales de sonido, y analizar la dispersión espacial del sonido producida por estos en función de diferentes parámetros estructurales de los cristales considerados. Para demostrar la aplicabilidad de estos dispositivos en el problema comentado, se ha realizado un ensayo acústico con un modelo a escala de la base de lanzamiento de cohetes. Para ello, se ha trabajado en rango ultrasónico y en agua en lugar de aire, permitiendo así reducir la escala del caso real; con un modelo simplificado de la plataforma de despegue, y con cuatro cristales de sonido a estudio diseñados mediante impresión 3D en titanio (véase Apartado 2). A su vez, se ha trabajado con una señal de banda ancha que nos permite obtener la respuesta al impulso del sistema para, posteriormente, separar la onda incidente y reflejada (véase Apartado 3). Por último, con la onda reflejada discriminada, se obtienen las propiedades del campo por efecto de dispersión de la estructura a prueba.

## 2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo este estudio experimental, se ha dispuesto en un tanque de agua, para medir en rango ultrasónico, una superficie reflectante que representa un modelo simplificado de la plataforma de despegue, similar a las configuraciones que se emplean en la actualidad. Esta estructura consta de un canal de forma rectangular abierto por los laterales (que en el sistema real sirven para evacuar los gases emitidos por los motores de propulsión) en el que se insertan los cristales de sonido bajo estudio (véase Fig. 3-(a)). El resto de la configuración experimental consta de la fuente sonora que es un transductor ultrasónico (equivalente al ruido de los motores), un hidrófono y tres ejes de posicionamiento motorizados para escanear las áreas de interés.

Aunque la zona de estudio del campo acústico es tridimensional, para este trabajo se han considerado dos secciones bidimensionales dado el gran volumen de datos y tiempo de medida: un plano de medida horizontal (perpendicular al cristal de sonido) para analizar los efectos en reflexión en campo cercano y otro vertical (paralelo a la estructura) mediante el cual se extraen los parámetros en campo lejano mediante una transformada de Fourier espacial; ambos planos se definen de tal manera que cubran la zona próxima a la estructura y a una distancia adecuada para poder separar la onda incidente y reflejada en el post-procesado (véase Fig. 3-(b)).

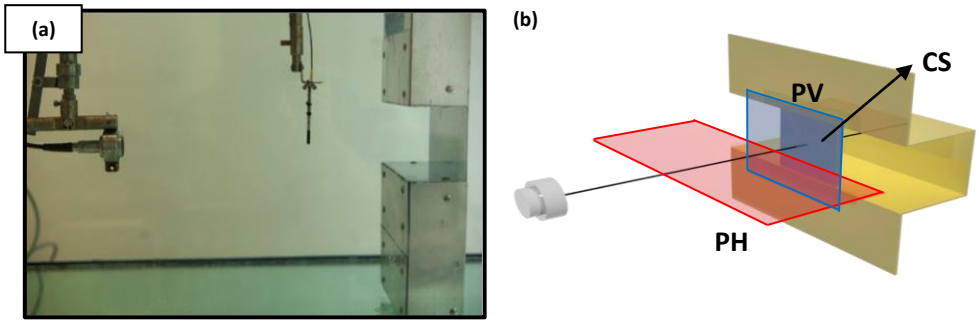



**Fig. 3. (a)** Configuración experimental. **(b)** Esquema tridimensional del dispositivo experimental con las áreas de medida sombreadas: PH, plano horizontal (rojo); PV, plano vertical (azul); y CS, cristal de sonido (gris).

Se fabricaron cuatro estructuras de cristal de sonido en polvo de titanio mediante impresión 3D. En su diseño se consideraron los dispersores con forma cuadrada de lado $L$, y se tuvieron en cuenta dos tipos de redes periódicas (cuadrada y triangular) siendo $a$ la separación entre distintos dispersores, y dos factores de llenado, $f$, alto y bajo ($f$ es una medida de la relación entre el volumen ocupado por los dispersores, con respecto al volumen total; en el caso de la red cuadrada, tiene el valor $f = (L/a)^2$ y para la red triangular $f = 4L^2/\left(\sqrt{3}a^2\right)$, véase Fig. 4).

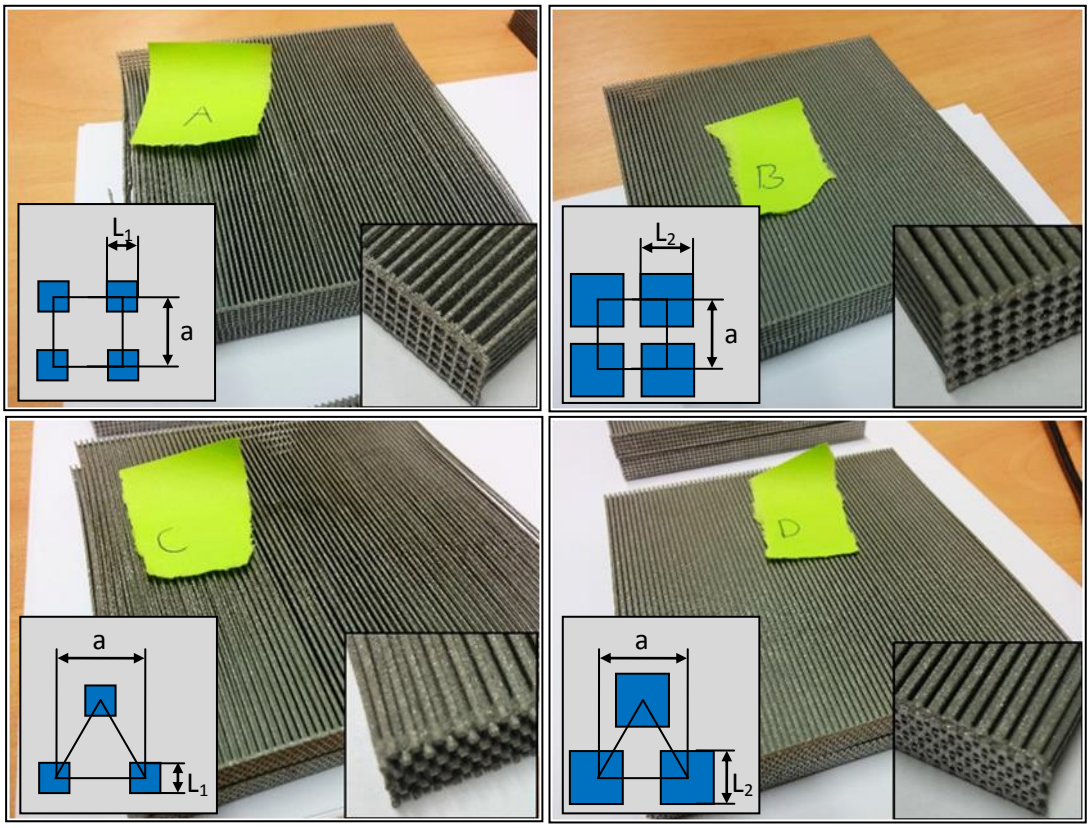



**Fig. 4.** Cristales de Sonido utilizados para el ensayo experimental.

Para la fabricación de las estructuras se han considerado dos tamaños de dispersores $L_1 = 0{,}45mm$ y $L_2 = 0{,}9mm$, siendo la constante de red $a = 1{,}45mm$. Este último factor junto con el fluido en el que se sumerge la estructura (agua), determina la frecuencia central a la que se sitúa el *band gap*, $f_{BG} = 517kHz$. En la Fig. 5 se puede observar la relación de dispersión, calculada numéricamente, de las cuatro estructuras fabricadas. En cada una se aprecian la primera y segunda bandas de propagación, observándose que alrededor de la frecuencia central del *band gap*, para una dirección dada, no hay definida ninguna banda, lo cual indica que la propagación está prohibida en ese rango de valores, siendo la distancia entre ambas bandas, la anchura del *gap*. Además, también se observa que para la estructura D, las bandas no son tangentes en ningún punto, lo cual implica que el *band gap* es completo para cualquier dirección de propagación (*full band gap*).

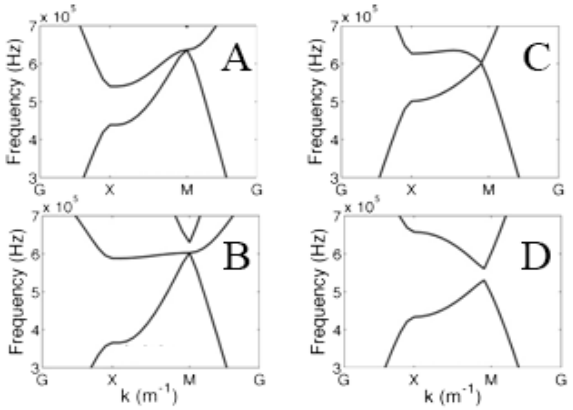



**Fig. 5.** Relación de dispersión de los cristales de sonido.

## 3. PROCESADO DE SEÑAL

Para el estudio de la respuesta de la estructura en reflexión y en banda ancha se ha seguido la técnica de medida de la respuesta al impulso mediante una señal modulada de forma logarítmica en frecuencia (chirp) [6]. Matemáticamente este chirp se pude describir como

$$x(t) = \sin[\theta(t)] = \sin\left[K \cdot \left(e^{t/L} - 1\right)\right],$$

cuya frecuencia instantánea es

$$\omega(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{K}{L} e^{t/L}.$$

Imponiendo como condición que en el instante inicial de la señal $t = 0$ la frecuencia tome el valor $\omega(t)|_{t=0} = \omega_1$ y en el instante final $t = T$ el valor $\omega(t)|_{t=T} = \omega_2$, se pueden deducir las constantes

$$K = \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}, \quad L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}$$

obteniéndose así una señal de duración $T$ cuya frecuencia varía logarítmicamente desde $\omega_1$ hasta $\omega_2$ (véase Fig. 6(a)).Esta señal de entrada se inyecta en el sistema, cuya respuesta al impulso $h(t)$ se desconoce, obteniéndose una respuesta $y(t) = x(t) * h(t)$. Utilizando la función inversa $x^{-1}(t)$ $(x(t) * x^{-1}(t) = \delta(t))$[7]

$$x^{-1}(t) = x(T - t) \cdot \frac{\omega_1}{\omega(t)} \quad \forall t \in [0, T],$$

se puede obtener la respuesta al impulso del sistema $h(t)$ haciendo la convolución con la respuesta medida, $h(t) = x^{-1}(t) * y(t)$.

Una vez obtenida la respuesta al impulso, mediante criterios geométricos o tiempos de propagación, se enventana la señal en cada punto de medida para obtener la reflexión producida por la estructura bajo test. Las señales temporales descritas en el procesado de señal se pueden ver en la Fig. 6.

Una vez post-procesada la señal se puede observar como el cristal utilizado en el ejemplo tiene una respuesta temporal más larga que la señal incidente y, además, que la cavidad situada detrás de éste provoca resonancias dado que, parte de la onda puede atravesarlo, reflejarse en el fondo y volver a atravesarlo repetidas veces (Fig. 6-(e)).

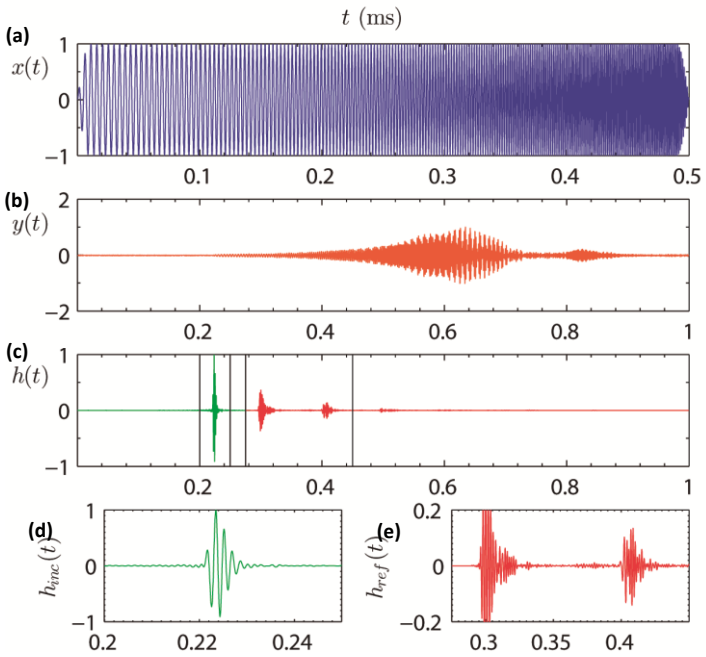



**Fig. 6. (a)** Señal de entrada emitida por el transductor. **(b)** Señal a la salida del sistema, recibida por el hidrófono. **(c)** Respuesta al impulso obtenida mediante post-procesado. **(d)** y **(e)** separación de las respuestas de la señal incidente y reflejada respectivamente.

## 4. RESULTADOS

Todas las medidas realizadas en este trabajo se han llevado a cabo en el rango de los ultrasonidos, empleandocomo emisor un transductor *Olympus Panametrics* A301S de frecuencia 0.5MHz, y 1'' diámetro (25mm), y un hidrófono *ResonTC4038,* utilizado para medir una señal de banda ancha desde 200kHz hasta 800kHz.

Para el análisis de la dispersión espacial del campo de presión tras la reflexión se han escogido tres frecuencias significativas, 300kHz, 550kHz y 660kHz, correspondientes a tres rangos de funcionamiento de los cristales de sonido: primera banda de propagación (300kHz), *band gap* (550kHz), y segunda banda de propagación (650kHz), respectivamente.

Las medidas en campo cercano se hicieron desplazando el hidrófono en el plano horizontal de la Fig. 3(b). En la Fig. 7-(a),se muestran los mapas de presión en campo cercano correspondientes a las tres frecuencias de estudio en el caso de la reflexión por un plano rígido situado en la misma posición dónde se ubican los cristales. Esta medida experimental se usará como referencia. A modo de ejemplo, se presenta aquí el análisis del caso de la estructura que hemos etiquetado como C, correspondiente a un cristal de sonido de red triangular y bajo factor de llenado ($f = 22{,}2\%$) en la Fig. 7-(b). Por lo general, el comportamiento de los cristales de sonido en el band gap, es muy similar al del plano rígido, ya que toda onda que incide sobre un cristal de sonido a la frecuencia del band gap, al no poder ser transmitida a través de él, resulta reflejada de manera casi especular. Este fenómeno es tanto más acentuado cuanto mayor es el factor de llenado. Por esta razón, debido al bajo factor de llenado, la estructura C presenta una mayor dispersión del campo acústico reflejado. Para frecuencias por debajo del band gap, existen diferencias respecto al reflector plano en lo referente a la distribución energética del campo acústico en el espacio, viéndose en la zona central (zona de especial interés dado que, en el sistema simulado, es donde se localizaría el cohete) una reducción importante del nivel sonoro. Dado que el cristal muestra una alta transmisión para dichas frecuencias, podemos inferir que la onda que atraviesa el cristal, llega al fondo del canal y se refleja atravesando de

nuevo el cristal, favoreciendo la atenuación debido a la propagación. Por encima del band gap, los efectos de periodicidad y de dispersión de bragg se vuelven importantes. Las ondas en el cristal sufren un fenómeno de dispersión múltiple, lo que da lugar a dispersión tanto espacial como temporal, como refleja el mapa correspondiente a 660kHz (Fig. 7-(b)).

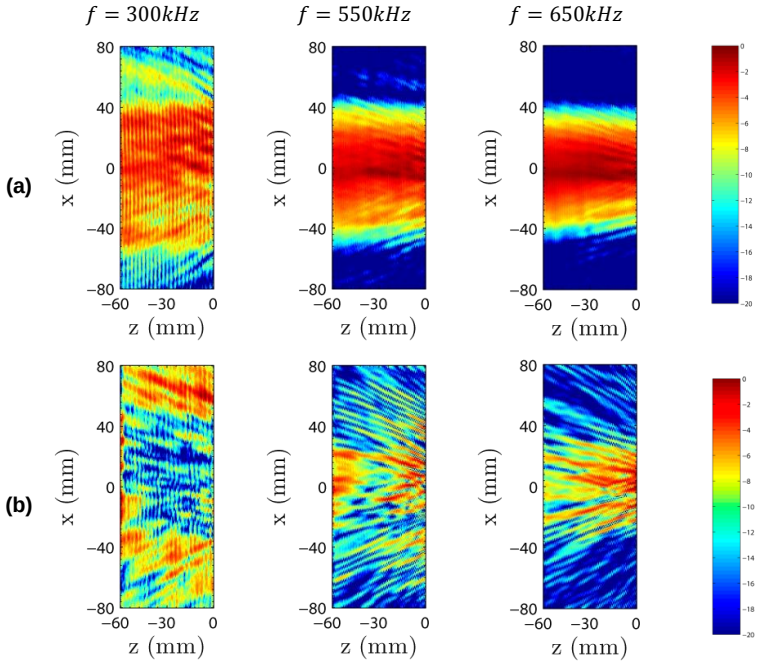
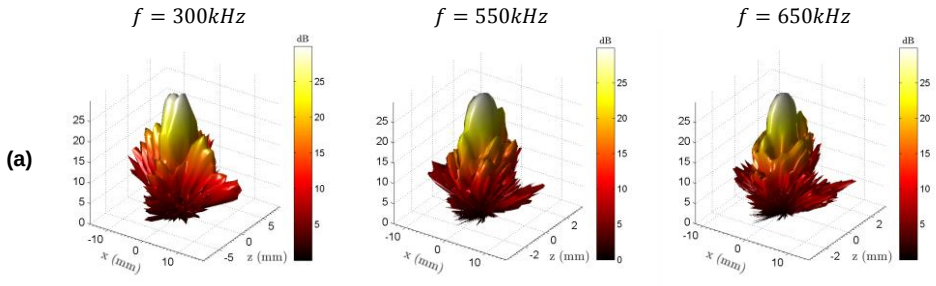



**Fig. 7.** Campo acústico reflejado por: **(a)** un plano rígido plana reflectante y **(b)** el cristal de sonido C, a tres frecuencias de trabajo: 300kHz, 550kHz y 650kHz.

La dispersión espacial, se aprecia más claramente con el cálculo del campo lejano. Mediante el plano vertical medido (véase Fig. 3-(b)), se realiza una transformación a campo lejano dónde se pueden analizar las direcciones privilegiadas de propagación del campo acústico. En la Fig. 8 se ha representado de nuevo, para los casos de plano rígido y la estructura C, dicha transformación a campo lejano. A primera vista, vemos que la distribución angular difiere, sobre todo para ángulo de reflexión especular (0º), siendo claramente más disperso en el caso de 650kHz para el cristal que para el plano rígido. También, se han medido el resto de estructuras: red cuadrada con factor de llenado bajo (Estructura A), red cuadrada con factor de llenado alto (Estructura B) y red triangular con factor de llenado alto (estructura D). En la Fig. 9 se representa el coeficiente de difusión definido según la norma ISO/CD17497-2 para el conjunto de las cuatro estructuras.



(b)

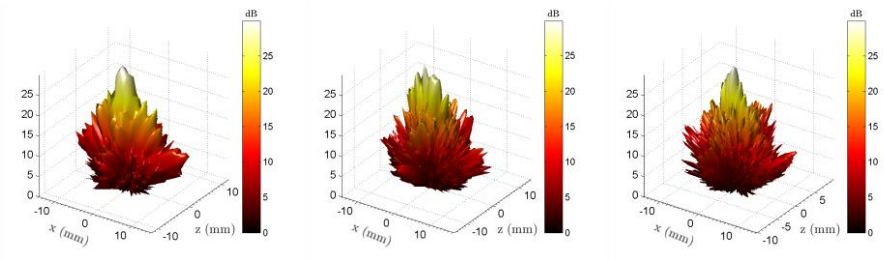



**Fig. 8.** Campo lejano reflejado para: **(a)** un plano rígido y **(b)** un cristal de sonido C, a tres frecuencias de trabajo: 300kHz, 550kHz y 650kHz.

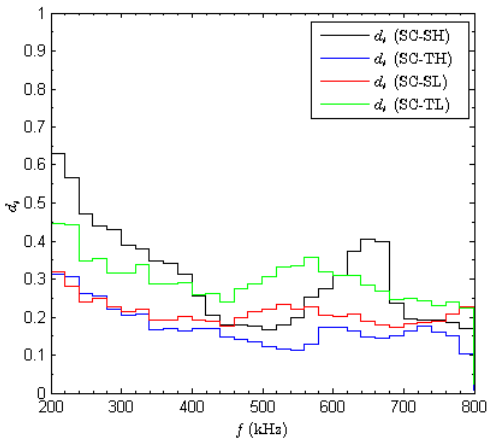



**Fig. 9.** Coeficiente de difusión: Estructura A **(rojo)**, Estructura B **(negro)**, Estructura C **(verde)** y estructura D **(azul)**.

Con este estudio, se han analizado las propiedades de reflexión de los cristales de sonido y se ha probado la aplicabilidad de estos elementos como dispersores acústicos en reflexión al disponerlos en la entrada de una cavidad resonante abierta por los laterales. Resulta de interés, la realización futura de un estudio de mayor profundidad con fuentes más parecidas a las reales (cohetes), es decir, con un ancho de haz más grande y a potencias superiores, llegando al régimen no lineal. Además, es necesario tener en cuenta la peculiar geometría de la plataforma de despegue (véase Fig. 2-(a)), su forma en pendiente está optimizada para la evacuación de gases, pero no con criterios acústicos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el programa ITI (Innovation Triangle Initiative) de la Agencia Espacial Europea (ESA) bajo el contrato 4000110685/14/NL/SC.A su vez, también ha contado con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad, proyectos FIS2011-29731-C02-02 y MTM2012-36740-C02-02.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]V. Romero-García; J. V. Sánchez Pérez; L. M. García Raffi. "*Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two-dimensional multiphysical phenomena periodic systems*". J. Appl. Phys. 110, 149041 - 149049 (2011).

[2] Vicent Romero-García, Sergio Castiñeira-Ibáñez, Juan Vicente Sánchez-Pérez, Lluís Miquel García-Raffi. "*Design of wideband attenuation devices based on Sonic Crystals made of multi- phenomena scatterers*". Société Française d'Acoustique Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France.<hal-00810973>

[3] R. P. Moiseyenko, S. Herbison, N. F. Declercq, and V. Laude."*Phononic crystal diffraction gratings*". J. Appl. Phys. 111, 034907 (2012).

[4] R.P. Moiseyenko, J.Liu, N. F. Declercq and V. Laude. "*Blazed phononic crystal grating*". Appl. Phys. Lett. 102, 034108 (2013).

[5] J. Redondo, R. Picó, V. J. Sánchez-Morcillo, W. Woszczyk, "*Sound diffusers based on sonic crystals.*" J. Acoust. Soc. Am. 134, 4412 (2013)

[6] Angelo Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept sine technique", *Presented at the 108th AES Convention, Paris, France*, 2000.

[7] Meng, Q., et al. "Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes." *IEEE. 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems.* 2008.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# CHANGES IN FIELD DISTRIBUTION FOR PHYSIOTHERAPY SYSTEMS WHEN IN CONTACT WITH SKIN MIMICS COMPARED TO THE FREE-FIELD DISTRIBUTION

PACS: 43.80.Sh

Francisco Chinchurreta[1], Rob Hekkenberg[2]
[1] Laboratory of Medical Ultrasound Metrology (LMUM), ITEFY, CSIC
Serrano 144, 28006 Madrid, Spain; Tel: 34 91 5618806, Fax: 34 914417651;
E-mail: francisco.chinchurreta@csic.es
[2] Network on Safety and Standards on Ultrasound
't Hofje 15, 2377 AZ Oude Wetering, The Netherlands; Tel: +31 (0)71 3315695;
E-mail: rob.hekkenberg@casema.nl

## ABSTRACT

Measurements have been done on three physiotherapy transducers, two operating at 1 MHz, and the other at 3 MHz. Three skin mimics with thicknesses of 0,5 mm, 1 mm and 1,5 mm, respectively, have been used. Four set of measurements have been carried out for each transducer-skin mimic combination: free field; contact; non-contact close distance (< 1mm); non-contact longer distance (> 2mm).

There have not been found evidences of relevant changes in the field distribution of any of physiotherapy transducer tested when in contact with skin mimics in comparison with the free-field distribution.

## RESUMEN

Se han realizado mediciones con tres transductores de fisioterapia, dos funcionando a 1 MHz y otro a 3 MHz. Se han utilizado tres simuladores de piel con espesores de 0,5 mm, 1 mm y 1,5 mm, respectivamente. Se han realizado cuatro series de mediciones para cada combinación transductor - simulador de piel: campo libre, contacto, no-contacto corta distancia (< 1mm); no-contacto mayor distancia (> 2mm).

No se han encontrado evidencias de cambios relevantes en la distribución del campo de los transductores ensayados cuando se hallaban en contacto con los simuladores de piel en comparación con la distribución de campo libre.

## 1 INTRODUCTION

Within the recently completed JRP of the EMRP Dosimetry for Ultrasound Therapy (DUTy) [1], the aim of one of its work packages (Application to clinical treatment (WP6)) was to provide a direct link between the methods developed in other WPs and the clinical use of therapeutic

ultrasound with the long-term aim of improving treatment planning. The task 6.2 had the aim of developing and evaluating a treatment planning protocol by combining clinical data from real patients at one of the participant institutes, obtained by MRI, CT and ultrasound, with the transducer characterization and modelling methods developed in other WPs.

It is well known that the physiotherapy systems typically have resonant transducers which can be sensitive to the acoustic load presented by the medium into which they radiate. It is also known that the power radiated changes with the thickness of the coupling gel layer and that the presence of membranes that can cause back reflections may affect not only to the radiated power but to the resonance frequency as well [2, 3]. An interesting question is whether the presence of these membranes, and specifically the skin, also affects the radiation pattern. In others words, whether the acoustic field radiated through skin is different from the acoustic field radiated directly into water, and whether it is also sensitive to gel thickness.

It was the responsibility of CSIC, through its Laboratory of Medical Ultrasound Metrology (LMUM), to evaluate the changes in the field distribution of physiotherapy systems when in contact with skin or skin mimics. This paper summarizes the results of such evaluation.

## 2 MEASUREMENT ELEMENTS AND SET-UP

To carry out the evaluation of the changes in the field distribution for physiotherapy transducers when in contact with skin or skin mimics, measurements have been made in the water tank of the LMUM. All measurements and associated calculations have been done in accordance with IEC 61689 [4, 5, 6].

### 2.1 Measurement Elements

#### 2.1.1 Skin mimics

There have been used three NPL of the following thicknesses: 0,5 mm, 1 mm and 1,5 mm respectively. All of them have a similar diameter of about 105 mm.

#### 2.1.2 Physiotherapy systems

There have been tested three physiotherapy systems composed of a signal generator, HP 3336C, a power amplifier, AR 75A250, and the following check sources, similar to physiotherapy transducers, produced at the TNO [7, 8]:

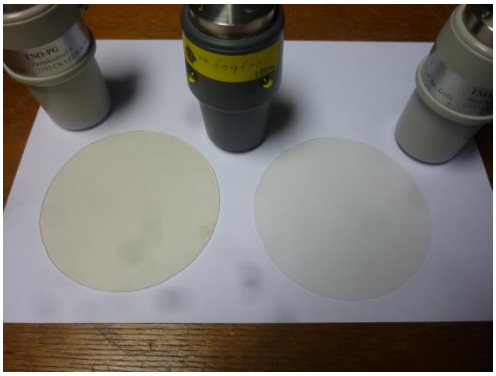
- TNO-CS G101: S= 5 $cm^2$; $f_r$ = 1,008 MHz
- TNO-TUI 609 : S = 5 $cm^2$; $f_r$ = 1,0023 MHz
- TNO-CS G301: S = 5 $cm^2$, $f_r$ = 3,0025 MHz

#### 2.1.2 Measuring and data acquisition system

The pressure measurements have been done with a calibrated set composed of a needle hydrophone, Dapco2, and a FET preamplifier, Tektronix P6201 FET probe, 50 Ω.

The hydrophone has been displaced to the required locations in the water by means of the computer controlled positioning system of the beam plot system installed in the water tank of the LMUM.

A fast digital oscilloscope, Tektronix TDS 3052C, 500 MHz, 5 Gs/s, has been used to acquire the pressure data that afterwards were transmitted via LAN to a computer for processing.



**a) NPL skin mimics**



**b) TNO check sources**

**Figure 2: Measuring elements**

## 2.2 Measurement Conditions

### 2.2.1 Input voltages

The following input voltages (peak to peak) have been used to feed the check sources:

- 14 v(PP) for TNO-CS G1011 and TNO-TUI 609;
- 14 V (pp) – 24 V (pp) for TNO-CS G301.

### 2.2.2 Skin mimic positions

3 separations between the transducers emitting surfaces and the skin mimics have been used:

- 0 mm, i. e. direct contact;
- 1 mm; and
- 2 mm – 4 mm.

### 2.2.3 Environmental conditions

All the measurements have been made in water under the following ranges of environmental conditions:

- Water temperature: 21 °C – 22 °C ;
- Air temperature: 22 °C – 25 °C mm; and
  Relative Humidity: 40 % - 45 %

# 3 EXPERIMENTAL RESULTS

## 3.1 Measurement Procedure

### 3.1.1 Measurement preparation

As it can be seen in figure 3, the skin mimics have been placed in position by means of a holder in such a way that the mimic faces were parallel to the transducer surface and that this were

placed at the centre of the membrane. Before this, care had been taken to achieve that the radiating surface of the transducer were parallel to the water surface.

The distance adjustment between the transducer and the membrane surfaces has been done out of the water. Once the right adjustment had been achieved, the holder was carefully removed by rotation to one side of the transducer, far from it and from the hydrophone, placed at the other side of the transducer.

After this, all the three elements have been slowly immersed into the water. Once the desired depth of the transducer surface had been reached, time was allowed for stabilization. Care has been taken to remove any bubble that could have been formed below the transducer surface and on the two faces of the mimic membrane. Once there was certainty that all air bubbles had been removed, a mirror has been used for this purpose, the holder was placed in position by gentle rotation, when required.

### 3.1.2 Measurement protocol

The pressure measurements begun once enough time had been allowed for stabilization after the water immersion. The measurement process followed has been a simplified version of the procedure described in IEC 61689 for the characterization of the acoustic field produced by physiotherapy transducers. Thus, series of perpendicular line scans, namely x-scan and y-scan, have been made on planes perpendicular to the transducer axis at different distances to identify the acoustic radiation axis of the beam emitted by the transducer. When carrying out the line scans, care has been taken in choosing a suited resolution and total length not to miss any relevant feature of the beam shape. Once two points belonging to the acoustic axis had been located, thanks to the identification of the x- and y-scans maxima or minima, as the case could be, an L scan has been conducted to find out the beam axial pressure distribution of the transducers.

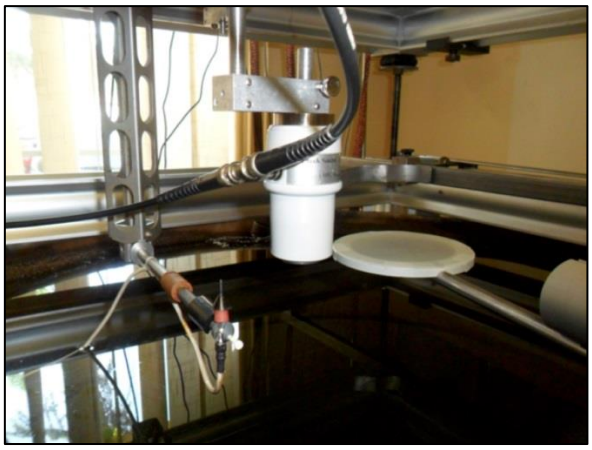


**Figure 3. Partial view of the measurement set-up**

Maxima and minima have been identified on the pressure axial distribution, and line scans have been taken in planes perpendicular at the beam axis at these points locations to find out the relevant beam profiles.

For each of the chosen separation distances between the transducer surface and the membrane, the whole process has been carried out for the two conditions, “free-field”, that is without membrane, and “disturbed”, that is, with the membrane placed. The series of measurements have been repeated several times and the order has been changed, sometimes beginning with the free-field condition and others with the “disturbed” condition.

## 3.2 Results at 1 MHZ

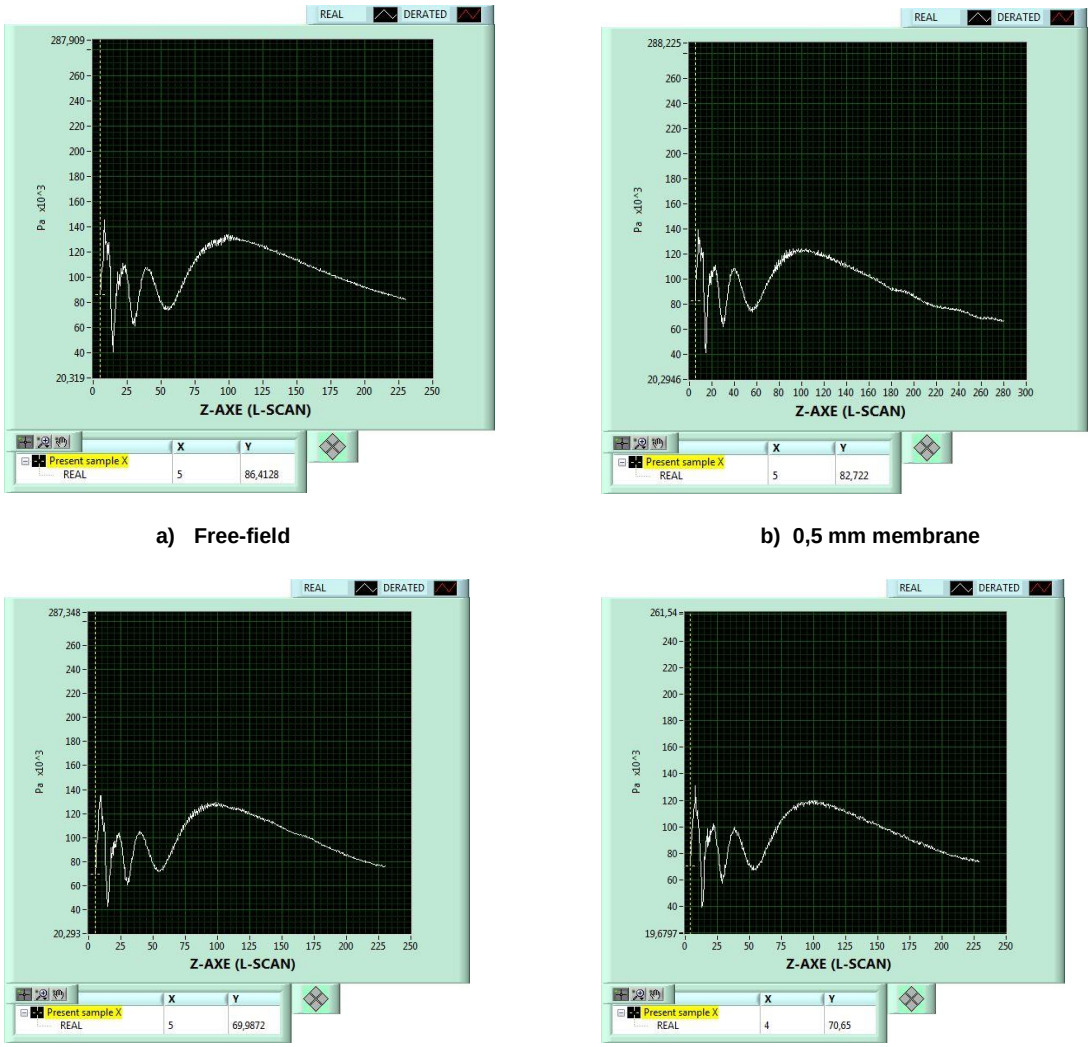
Due to space limitations it is impossible to show a complete set of the results obtained. Therefore only some results corresponding to TNO-CS G101 are presented in figure 4. The results showed correspond to the situation in which the membranes were in contact with the surface of the emitting transducer. However, the results obtained for the other separations and for the other transducer have been entirely analogous.

From the analysis of the obtained beam axial pressure distributions, the L scans, it could be seen that there was not any relevant different in the shapes of the axial profiles between the free field situation and those with each of the three membranes. The only differences seemed to be in the values of the pressure maxima.

This impression was confirmed when the perpendicular line beam profiles, x and y, were carried out at relevant positions along the beam axial pressure distribution. From the study of these profiles, it could be concluded that there were no relevant changes in the profile shapes corresponding to the four situations, that is, free-field emission, and the transmission through membranes with thickness of 0,5 mm, 1 mm and 1,5 mm respectively.

As it regards the amplitude of the maxima, there was a small amplitude reduction as the thickness of the membrane increased that seems to be compatible with the absorption caused by the interposed membranes.

**Beam axial pressure distributions**




a) Free-field

b) 0,5 mm membrane

c) 1 mm membrane

d) 1,5 mm membrane

**Figure 4: Beam axial pressure distribution of TNO-CS G101 (1 MHz) for different couplings**

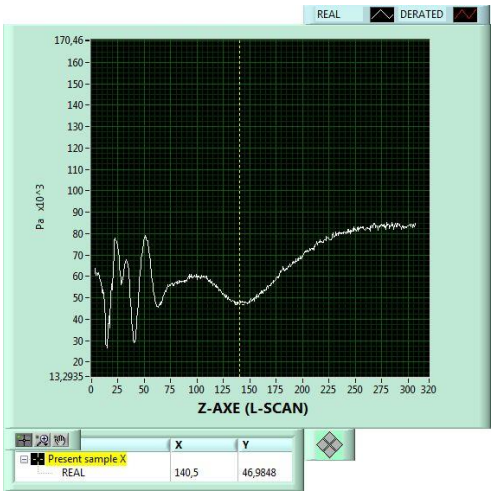
### 3.3 Results at 3 MHz

A selection of the results corresponding to TNO-CS G301 is presented in figures 5 and 6.

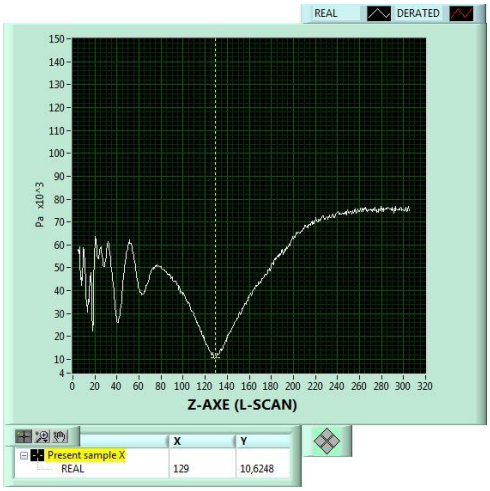
The results presented correspond to the situation in which the membranes were in contact with the surface of the emitting transducer. However, the results obtained for the other separations have been entirely analogous.

Although the radiation beam profiles at 3 MHz are much more complicated than at 1 MHz, from the analysis of the obtained beam axial pressure distributions, the L scans, it could also be seen that there were not great relevant differences in the shapes of the axial profiles between the free field situation and those with each of the three membranes, with the exception of a big fall corresponding to the case with the 0,5 mm membrane. As in the 1 MHz case, the main differences seemed to be in the values of the pressure maxima.

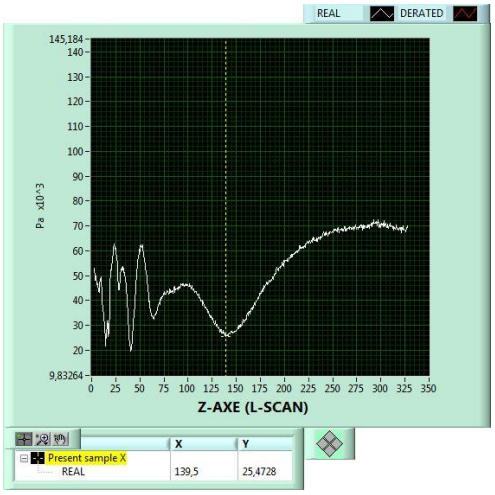
**Beam axial pressure distributions**



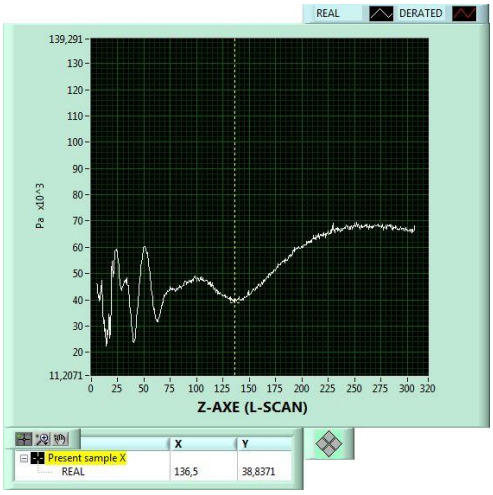

b) Free-field




b) 0,5 mm membrane




d) 1 mm membrane

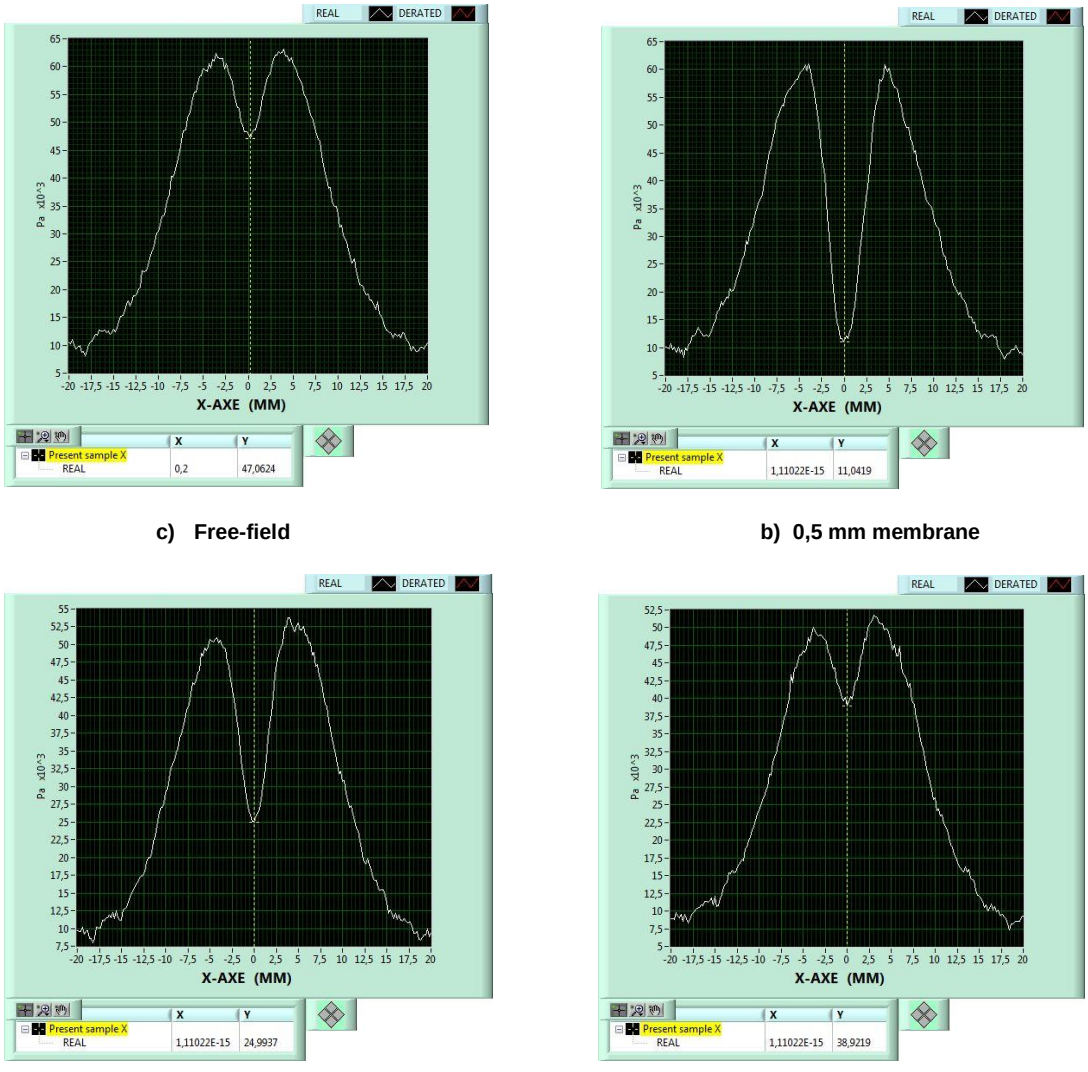



d) 1,5 mm membrane

**Figure 5: Beam axial pressure distribution of TNO-CS G301 (3 MHz) for different couplings**

This impression was confirmed when the two perpendicular line beam profiles, x and y, were carried out at relevant positions along the beam axial pressure distribution. From the study of these profiles, it could be concluded that, leaving apart the case of the main minimum, there were no relevant changes in the profile shapes corresponding to the four situations, that is, "free-field" emission, and the transmission through membranes with thickness of 0,5 mm, 1 mm and 1,5 mm respectively.

**Beam profiles (x-scan) at main minimum (z ~ 140 mm)**




c) Free-field

b) 0,5 mm membrane

e) 1 mm membrane

d) 1,5 mm membrane

**Figure 6: Beam profiles (x-scan) at main minimum (z ~ 140 mm) of TNO-CS G301 (3 MHz) for different couplings**

As it regards the amplitude of the maxima, there was a small amplitude reduction as the thickness of the membrane increased that seems to be compatible with the absorption caused by the interposed membranes.

The case of the main minimum with a great fall for the 0,5 mm membrane, which recovers as the membrane thickness increases, it is probably linked to changes in the diffraction pattern due to the relation between the membrane thickness and the wavelength both in water and in the own membrane, though this issue should be investigated further.

## 4 CONCLUSIONS

There has not been found evidence of relevant changes in the field distribution of the physiotherapy transducers studied, in comparison with the free field distribution, when in contact with skin mimics.

In spite of having carried out hundreds of measurements, having used three different systems, operating at two frequencies, 1 MHz and 3 MHz, altogether with membranes of three different thicknesses, only minor amplitude changes, compatible with absorption in the membranes, and a case of possible diffraction pattern modification, have been found.

## 5 REFERENCES

1 1 *Dosimetry for Ultrasound Therapy* (*DUTy*), Joint Research Project HLT03 of the European Metrology Research Programme (EMRP), June 2012 – May 2015.

2 M. J: Lunt, F. A. Duck *Ultrasonic power balances – effect of a coupling window on the power measured from physiotherapy ultrasound units,* Ultrasound in Med. Biol. 2001; Vol. 27, pp. 1127-1132

3 K. A. McBride, S.D. Pye. *The effect of back reflections on the acoustic power delivered by physiotherapy ultrasound machines.* A. Karne, Ultrasound in Med. Biol. 2009; Vol. 35, pp. 1672-1678

4 IEC 61689, *Ultrasonics — Physiotherapy systems — Performance requirements and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

5 IEC 62127-1, *Ultrasonics — Hydrophones — Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz*

6 IEC 60601-2-5, *Medical electrical equipment – Part 2-5: Particular requirements for basic safety and essential performance of ultrasonic physiotherapy equipment*

7 R.T.Hekkenberg, K.Beissner, B.Zeqiri: *Therapy-level ultrasonic power measurement*, Euroson 98 - SFAUMB 98, France, Tours, March 1998. European Journal of Ultrasound, p.p. S17, Vol.7, Suppl. No.1, Febr. 1998

8 R.T.Hekkenberg, K.Beissner, B.Zeqiri, *Therapy-level ultrasonic power measurement, Final Technical Report, EC project SMT4-CT96-2139*, European Commission report EUR 19510, ISBN 92-828-9027-9, 2000

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# NON-INVASIVE TEMPERATURE ESTIMATION ON TMM BASED ON THE ECHO-SHIFT METHOD

PACS: 43.80.Jz

Francisco Chinchurreta[1], Rob Hekkenberg[2]
[1] Laboratory of Medical Ultrasound Metrology (LMUM), ITEFY, CSIC
Serrano 144, 28006 Madrid, Spain; Tel: 34 91 5618806, Fax: 34 914417651;
E-mail: francisco.chinchurreta@csic.es
[2] Network on Safety and Standards on Ultrasound
't Hofje 15, 2377 AZ Oude Wetering, The Netherlands; Tel: +31 (0)71 3315695;
E-mail: rob.hekkenberg@casema.nl

## ABSTRACT

Using a modified US imaging device a non-invasive temperature measuring method based on determining time shifts in ultrasound echo signals, originally developed at the Dutch TNO, has been implemented.

Measurements have been made on two pieces of Agar based tissue mimic phantom (TMP), using a 3MHz physiotherapy transducer as heater, and a 7 MHz linear probe. One of the TMP was cut in several slices to allow the use of monitoring thin-film thermocouples.

Measurements have been done at different depths and in a range of temperatures 25 – 50 °C.

The obtained the results are discussed: further improvements are required.

## RESUMEN

Utilizando un dispositivo de imagen por ultrasonidos modificado, se ha desarrollado un método no invasivo de medida de la temperatura, basado en determinar desplazamientos temporales en ecos ultrasónicos.

Se han realizado mediciones sobre dos piezas de simuladores de tejidos (TMP) utilizando un transductor de fisioterapia de 3 MHz como calentador, y una sonda lineal de 7 MHz. Uno de los TMP fue cortado para facilitar la utilización de termopares de control.

Se han realizado mediciones a diferentes profundidades y en un rango de temperaturas entre 25 °C y 50 °C.

Se discuten los resultados obtenidos: mejoras adicionales son necesarias.

## 1 INTRODUCTION

Within the recently completed JRP of the EMRP "Dosimetry for Ultrasound Therapy (DUTy)" [1], the aim of the Task 2.4 of the work pack 2 (Laboratory dosimetry standards (WP2)) has been to develop and evaluate invasive and non-invasive measurement methods suitable for laboratory dosimetry standards for quantities related to thermal mechanisms. Within the DUTy project, it has been evaluated the suitability of different US techniques to serve as a laboratory dosimetry standard for thermal dosimetry. One of main results of this evaluation has been to consider the echo-shift method [2, 3, 4]. as the most promising method to estimate temperature variations in phantoms.

CSIC, through its Laboratory of Medical Ultrasound Metrology (LMUM), has implemented and evaluated a version the echo-shift method to estimate temperature changes in tissue mimic phantoms (TMP). The implementation, done manually with the aid of an Excel sheet, is based in determining velocity changes caused by heating from an ultrasonic physiotherapy transducer within TM phantoms.

## 2 MEASUREMENT ELEMENTS AND CONDITIONS

### 2.1 Measurement Elements

**2.1.1 Tissue mimic:** The measurements have been made on two agar-based phantoms produced by the NPL in accordance with the specifications of IEC 60601-2-5 [8]. One of them was sliced in three parts to enable the insertion of thermocouples to check the temperature reached inside the phantom.

**2.1.2 Ultrasound imaging device:** A modified Philips sono Diagnost 360 diagnostic ultrasound device, equipped with a 7,5-MHz linear array probe, LA10040, has been used to acquire the echoes from the scatterers in the TM phantoms.

**2.1.3 Heating system:** A TNO-made physiotherapy transducer, TNO-CS G301 (5 $cm^2$, 3,0025 MHz, variable power), connected to a generator, HP 3336C, and a power amplifier, AR 75A250, has been used to rise the temperature of the phantoms. A digital oscilloscope, Tektronix TDS 2002, has been used to monitor the input voltages.

**2.1.4 Temperature measuring system:** An Omega 0,013 mm foil (thin film) thermocouple, together with a FLUKE 51 II thermometer, has been used to measure the temperature inside the sliced TM phantom.

**2.1.5 Data acquisition system:** A fast digital oscilloscope, Tektronix TDS 3052C, 500 MHz, 5 Gs/s, has been used to record the backscattered echoes, so that a later analysis could be done in a computer.

### 2.2 Measurement Conditions

The following input voltages have been used to feed the heating physiotherapy transducer (TNO-CS G301): 30 V (pp), 40 V (pp) and 55 V (pp).

All the measurements have been made in air under the following ranges of environmental conditions: air temperature: 21 °C – 22 °C; relative humidity: 40 % - 45 %. A coupling gel was applied between the phantom surface and the applied transducers and between the contacting surfaces of the phantom slices.

## 3 TEMPERATURE ESTIMATION PROCEDURE

Our implementation of the echo-shift method is based in the procedure developed by the TNO in the nineties [5, 6, 7]. In this procedure the changes of the sound velocity within a TMP caused by heat were determined. An experimental set-up as the one showed in figure 2 has been used. An ultrasound beam emitted by an ultrasound imaging transducer propagates through a medium that is heated by another ultrasonic transducer. As the medium contains scatterers, the emitted beam is partially reflected black. The backscattered signals received by the echo transducer are then recorded and processed. This process had already been made before applying the heating in order to establish a zero reference. In these measurements the diagnostic device has been working in the M mode.

The recorded beams can be divided into small regions identified, in the oscilloscope or computer screen, as time packages of the signal that have a length of about 2 to 4 periods of the echo signal. Each small signal package before heating is then matched – by a least squares fitting algorithm, in the original procedure, and manually in our case, representing the recorded beam data in an Excel sheet to the almost identical signal package after heating. Since the local backscattering is specific to that region, a small time difference, with respect to the front TMP echo, will exist between each package pairs. By this, for each package, a determined time shift equal to the amount of time that the packages had to be moved to match is obtained. When going further in the signal, i.e. further from the front echo, this time difference or 'shift' increases as long as the temperature in the corresponding physical region is elevated with respect to the "no heating" case, see figure 1.

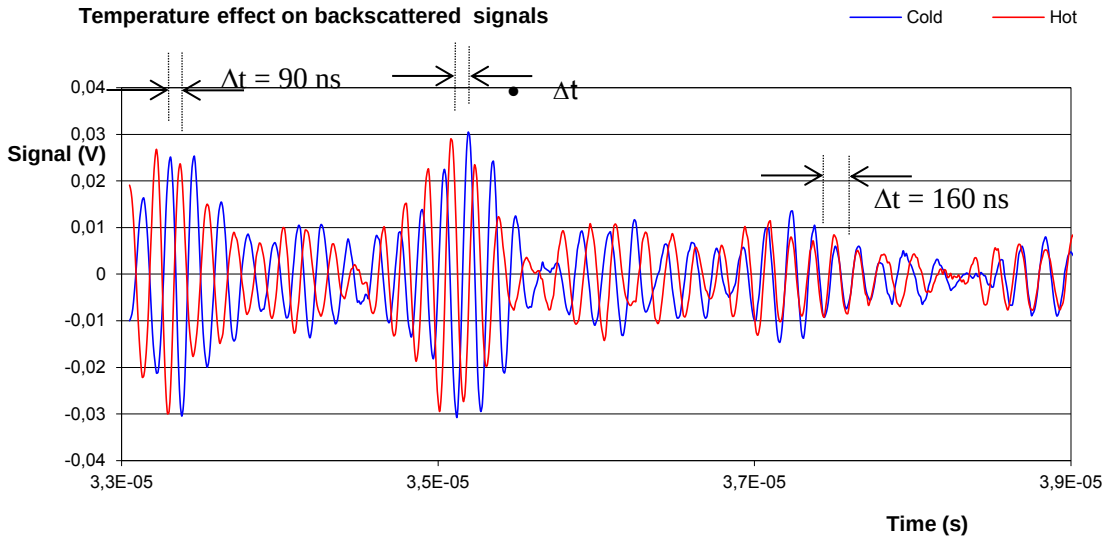



**Figure 1: Backscattered echo-signal before (blue) and after (red) heating. The shift between the signals increases, indicating a temperature rise. The increase per time unit is higher on the right than on the left, indicating a higher temperature rise in the right than on the left (The graph has been taken from the original TNO work)**

The physical locations, in mm, of these small regions are calculated from the time intervals between the echo of the front of the TMP and the echoes from two consecutive regions, the one concerned and the previous one. At the same time, the time interval associated to any of these regions is obtained from the average of the times corresponding to the heated, or shifted, and non-heated situations. Then, the change of the speed of sound for any of these particular

regions is calculated as its relative time shift, difference between the time shifts corresponding to the concerned region and the previous one, divided by its associated relative time, difference between the times corresponding to that region and the previous one, and multiplied by the value the speed of sound in the TMP at the non-heated condition.

To obtain the temperature change in the concerned region from the estimated change in speed of sound it is necessary to know the relation between the speed of sound and the temperature for the concerned TMM. The obtainable accuracy of this method to estimate temperature changes within a TMP will depend on the accuracy with which this relation is known. In most cases this relation can be determined experimentally.

Unfortunately, for the results presented in this report, this was not possible and values provided by the PTB have been used instead.

For our measurements beam fragments of 140 μs have been used. The signals have been acquired by a digital oscilloscope and recorded for their later processing,

In order to obtain a better spatial resolution and to avoid the effects of possible hot points, our recorded beams were divided in fragments of 3 μs which in turn were analysed in intervals of 1 μs, in such way that 3 time shifts were determined. These values were averaged and the result was the value of the time shift corresponding to each 3 μs fragment. The time position associated to each fragment was the average of the three pairs for which the shifting process was carried out.

To obtain a smoother temperature profile, the shifts at the different locations were approximated by a polynomial fit. Though the order of this polynomial should be even and as low as possible, since the resulting temperature profile should be an even function of location and approximately Gaussian, a six order polynomial has been chosen as it rendered the best results.

## 4 MEASUREMENT RESULTS

### 4.1 Temperature Estimation on a Sliced Phantom

As it can be seen in figure 2, in order to be able to check the estimated results with real temperature measurements, the phantom was cut in three parts. The first one had a mean thickness of about 13 mm, while the second had a mean thickness of about 10 mm. The third layer was, then, the rest of the phantom, with a thickness of about 75 mm.

Unfortunately, it was not possible to find a way to make clean, uniform cuts in the phantom. This caused that the sliced layers had rough borders and not completely parallel. This brought about the need to be very careful when choosing the measuring scan line for the nominal distances corresponding to the layers in order to avoid crossing discontinuities that could cause disturbing scatters. Usually it was decided to move the line about 1 – 2 mm to avoid the discontinuities.

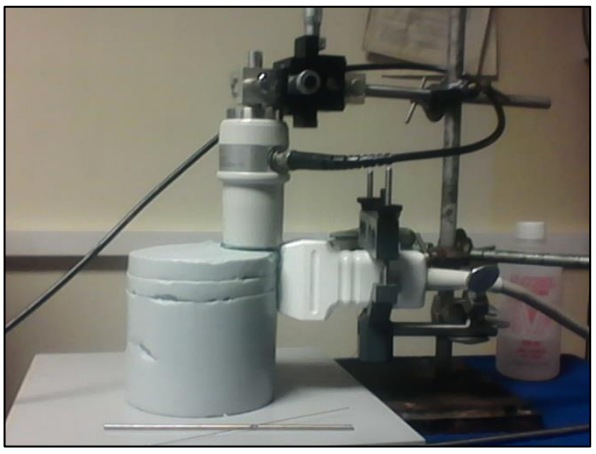


**Figure 2. View of the measured sliced TM phantom**

Especial care was taken in maintaining the

relative positions of the two transducers involved constant, in order to make the comparison of estimations made under different conditions and in different days more reliable Throughout all the measurements process, the distance between the centre of the heating transducer and surface of the imagining transducer was about 22 mm.

Temperature estimations have been made for different depths within the phantom using different M scan lines, at about 9 mm, 13 mm, 19 mm and 28 mm, from the top of the phantom. For each depth, or, in other words, for each scan line, estimations have been made for three different input voltages, whose nominal values have been 30 V(pp), 40 V(pp) and 56 V( pp).

Control temperature measurements with a thermocouple have been made for the three input voltages at two depths: about 13 mm and about 23 mm. At each depth, measurements have been made at three locations: at about 10 mm, 22 mm and 30 mm from the emitting surface of the imaging transducer (lateral of the phantom.).

Unfortunately the results obtained have not been good, with irregular temperature profiles, far from the Gaussian shape, bad repeatability and important differences with the control temperatures measured with the thermocouple, especially for the highest voltages.

In what follows, due to space limitations, only some of the results are presented in figures 3 and 4, In the graphs, the dark blue curve corresponds to measured time shifts, the red to the estimated relative increase of temperature, with respect to the initial temperature (no heating), where a constant value, the one corresponding to the initial temperature, has been used for the relation between the increase of speed of sound and the temperature. The green curve is the results of using a polynomial fit for the determined time shifts. The purple curve is obtained when both the polynomial fit for the time shifts and a temperature dependent relation between the change of the speed of sound and the temperature are used. Finally, the black curve corresponds to the polynomial fit of the temperatures measured with the thermocouple. The equation and the corresponding regression coefficient are shown for the polynomial fitted curves. The input voltage used, the initial (before heating, for the sliced TMP, or ambient, for the non-sliced TMP) temperature, *T*i, and the line distance are also showed.

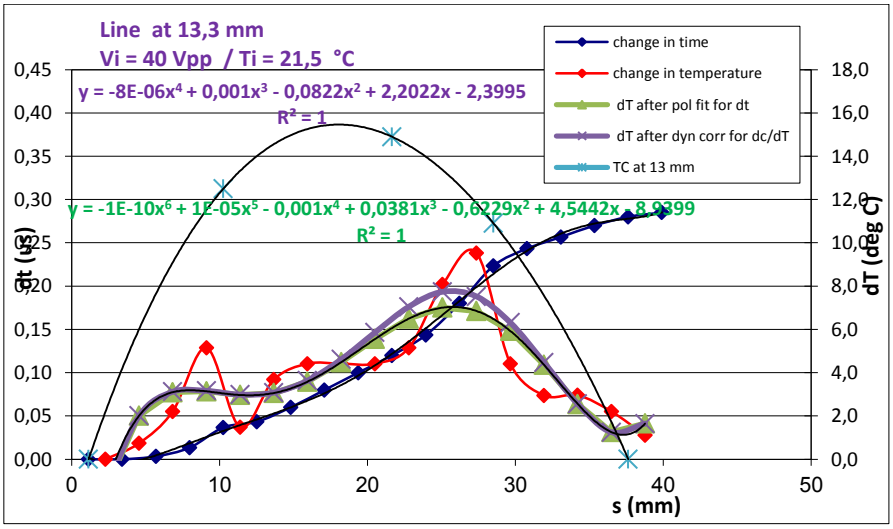
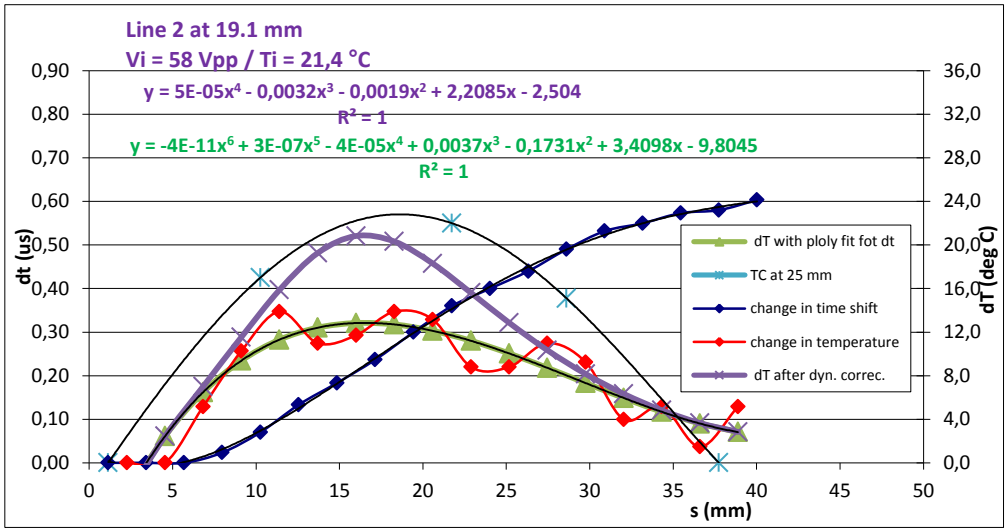
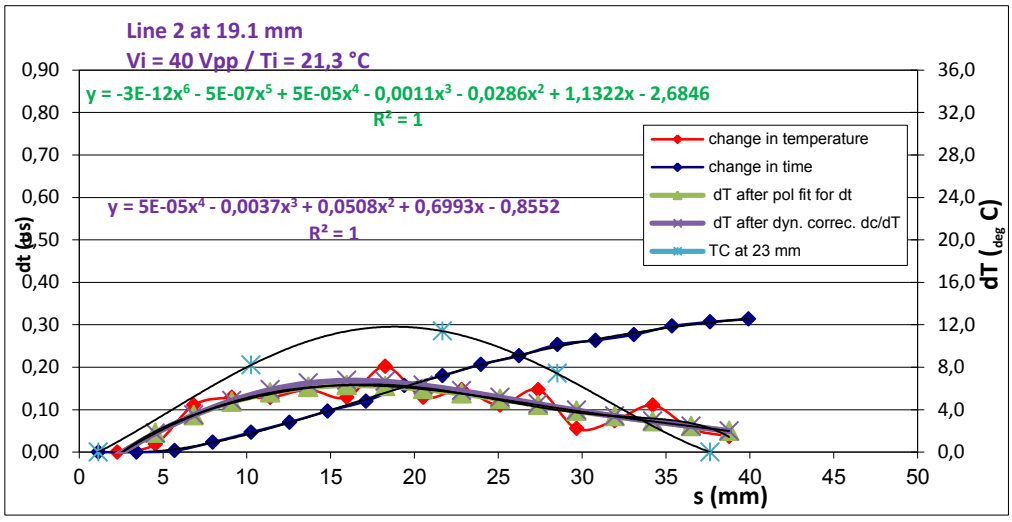



**Figure 3: Rise of temperature estimation at 13,3 mm from the phantom top**



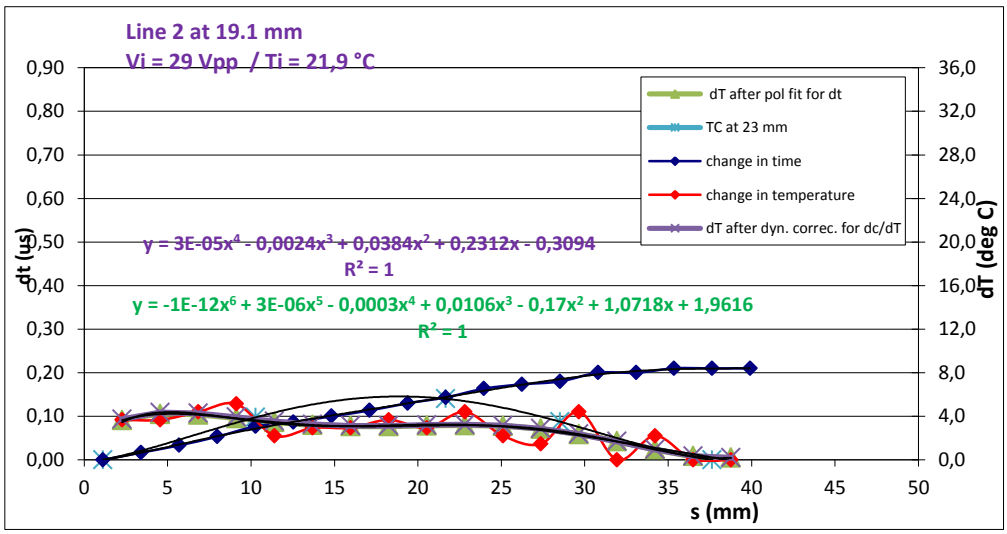




**Figure 4: Rise of temperature estimation at 19,1 mm from the phantom top**

### 4.2 Temperature Estimation on an Sliced Phantom

Although the results have improved, especially as it regards the temperature profile shapes and the repeatability, the obtained values are not satisfactory yet, especially as it regards the comparison with the "real" temperature values. Certainly, those values were measured for another phantom, which besides was somehow damaged by the cutting procedure, but it is surprising that the estimated values obtained when the temperature dependent relation between the change in the speed of sound and the change in temperature (dc/dT), derived from the PTB data, is applied (purple curve), most of the new estimations are much higher, especially for higher input voltages, than those obtained with the thermocouple (black curve). The situation is the opposite when a constant relation is assumed (green curve).

A sample of the results is showed in figure 5

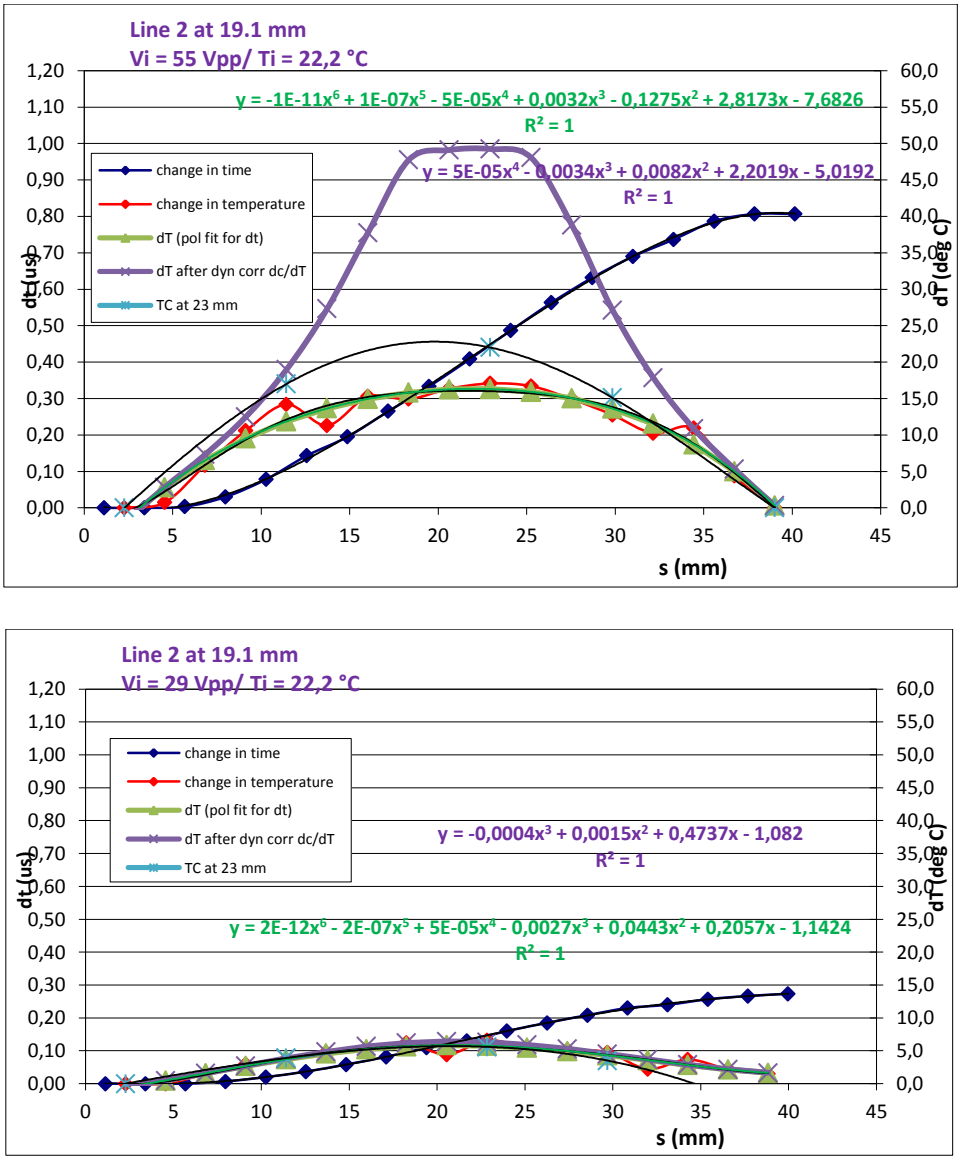



**Figure 5: Rise of temperature estimation at 19,1 mm from the phantom top**

## 5 CONCLUSIONS

LMUM has implemented and evaluated a manual, Excel-based version of the echo-shift method to estimate temperature changes in TM phantoms.

The results obtained on sliced phantoms, to enable the use of control thermocouples, have not been good, with irregular temperature profiles, far from the expected Gaussian shape, bad repeatability and important differences with the control temperatures measured with thermocouples, especially for the highest input voltages.

The results have improved with the use on a new non-sliced TM phantom, especially as it regards temperature profile shapes and repeatability, but the obtained values are not satisfactory yet, especially as it regards the comparison with the "real" temperature values.

Since the echo-shift method to estimate temperature changes in TMP is well established and, besides, its suitability has been positive evaluated within DUTy, much more work has to be done with our implementation, especially in determining the elastic, acoustic and thermal properties of the phantom and in measuring the real inner temperature, as in our experience, the cutting process can badly damage the phantom. Besides, a review of the estimation process employed is necessary. It is clear that the manual process used for these measurements needs to be substituted by a computer controlled procedure which will allow a faster and more comprehensive estimation.

## 6 REFERENCES

1 *Dosimetry for Ultrasound Therapy* (*DUTy*), Joint Research Project HLT03 of the European Metrology Research Programme (EMRP), June 2012 – May 2015.

2 R. Seip, P. Van Baren, C. Simon, E.S. Ebbini. *Non-invasive spatio-temporal temperature change estimation using diagnostic ultrasound*, Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1995, pp. 1613-1616.

3 R. Maass-Moreno, C. Damianou. *Noninvasive temperature estimation in tissue via ultrasound echo shifts. Part I. Analytical model*, J. Acoust. Soc. Am., 1996, V. 100, pp. 2514-2521.

4 R. Maass-Moreno, C. Damianou, N. Sanghvi. *Noninvasive temperature estimation in tissue via ultrasound echo shifts. Part II. In vitro study*, J. Acoust. Soc. Am., 1996, V. 100, pp.2522-2530.

5 R.T. Hekkenberg, R.A. Bezemer, *Indication of temperature in tissue for physiotherapy ultrasound*, PG/TG/2001.249 anonymous, February 2002.

6 R.T. Hekkenberg, R.A. Bezemer, G.v.Loon, *TNO-PG and Ultrasound, Current work and challenging measurements*, presentation at SUGB, Leiden, April 2002

7 R.T. Hekkenberg, R.A. Bezemer, G.v.Loon, *Alternative method to estimate temperature rise in tissue*, presentation at TC87/WG14, Florence, May 2003

8 IEC 60601-2-5, *Medical electrical equipment – Part 2-5: Particular requirements for basic safety and essential performance of ultrasonic physiotherapy equipment*.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS PARA LA DETECCIÓN DE PICUDO ROJO EN PALMERAS DE GÉNERO *PHOENIX*

**PACS:** 43.35.+d

Jorge, David [1]; Rubio, Constanza [2]; Bravo, José Mª [2]; Ferri, Marcelino[3]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del medio Natural, Universitat Politècnica de València; dajorga2@etsiamn.upv.es
[2] Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia E46022; crubiom@fis.upv.es, jobrapla@fis.upv.es
[3] Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia E46022; mferri@fis.upv.es

## ABSTRACT

In recent years, the emergence of *Rhynchophorus ferrugineus* (red palm weevil) is affecting the palms of the Mediterranean area. The fight against the insect plague is planned in early stage of infection or as a preventive method. In this line, this work provides a methodology based on non-destructive testing for the detection of bore by red palm weevil larvae. Ultrasonic signals are used for this purpose. Two different study techniques widely used in other areas, such as phase delay and eco-impulse have been applied. A protocol that allows the detection of the galleries, artificially induced in vegetal material, has been established.

## RESUMEN

En los últimos años, la aparición de *Rhynchophorus ferrugineus* (picudo rojo) está afectando a las palmeras del arco Mediterráneo. La lucha contra la plaga de estos insectos está prevista en la etapa temprana de la infección o como método preventivo. En esta línea, este trabajo proporciona una metodología, basada en ensayos no-destructivos, para la detección de galerías realizadas por las larvas de picudo rojo mediante señales de ultrasonido. Se han aplicado dos técnicas utilizadas en otros ámbitos como son el retardo de fase y el eco-impulso. Se ha establecido un protocolo que permite detectar las galerías, provocadas artificialmente, en el material vegetal.

## INTRODUCCIÓN

Gracias a sus características, el uso de ultrasonidos resulta una técnica que ofrece un amplio abanico de aplicaciones dentro del ámbito agroforestal siendo utilizada en muchos países para estimar la calidad de la madera de distintas especies, así como la detección de imperfecciones causadas por distintos agentes físicos como daños provocados por insectos xilófagos (Acuña et al., 2006). Además, recientemente, un estudio manifestó que los ultrasonidos son capaces de detener el crecimiento de micro y macroalgas en balsas de riego evitando problemas de obturación en los goteros de riego (Maestre et al., 2015) o la mejora de la calidad de procesos dentro de la industria agroalimentaria.

El presente estudio nace de la necesidad de controlar la plaga de Rhynchophorus ferrugineus (picudo rojo o gorgojo de las palmeras) que está causando la muerte de muchas especies vegetales de la familia de las palmáceas especialmente del género Phoenix como son P. *dactylifera* o *P. canariensis*. España es un país muy vinculado a este cultivo en todas las provincias de la cuenca mediterránea, siendo la Comunidad Valenciana con más de 500 ha cultivadas y una producción de 8.000 toneladas anuales, una de las regiones más importantes. El cultivo presente interés ornamental y comercial tanto para la producción de dátiles como para la obtención de la palma blanca en la zona productora de Elche. Este producto único en el mundo se obtiene por el encaperuzamiento de las hojas más nuevas de la palmera. Además, las palmeras *Phoenix* sp. constituyen una especie de gran valor ornamental, sobre todo en zonas del litoral mediterráneo, llegando a tener en 2006 cada palmera un valor aproximado de 15.000€ (MAGRAMA, 2015).

El picudo rojo es un insecto perteneciente al orden de los coleópteros. Los principales daños ocasionados en las palmeras son producidos por las larvas al alimentarse del tejido interno del tronco, concretamente en la zona apical cercana a las hojas siendo las galerías producidas por estos insectos de entre 5 y 10 mm de diámetro aproximadamente. En la actualidad existen diversos mecanismos de control de la plaga (químico, biológico, biotécnico, entre otros) cuyo éxito está muy ligado a la detección temprana de la infestación. Por ello, el empleo de técnicas no destructivas, como ahora el posible uso de ultrasonidos, que permitan detectar precozmente la presencia de picudo rojo en las palmeras resulta de gran importancia ante este problema. Por ello, el presente trabajo se postula como un primer paso que permita detectar galerías en material vegetal de palmeras del género *Phoenix,* en condiciones de laboratorio.

## METODOLOGÍA Y SET-UP EXPERIMENTAL

La hipótesis con la que se trabaja se basa en la disminución de amplitud en la señal registrada en los transductores receptores, que cabe esperar cuando un orificio se interpone entre la

emisión y recepción de la señal (efecto sombra). Asimismo se estudian cambios en aspectos temporales de la señal como ecos, desfases o retardos, en general, interferencias de la señal consigo misma al ser reflejada por el cambio de impedancia debido a la existencia de galerias. En esta fase de la experimentación, se han abierto galerías artificiales, para poder controlar diferentes parámetros, empleándose fragmentos de palmeras con tejido vegetal totalmente seco, por considerase ésta la condición más desfavorable.

Las medidas se han realizado en un laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural (ETSIAMN) situada en el Campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Los fragmentos de palmeras sobre los cuales se ha realizado el estudio se recogieron de distintas palmeras datileras muertas del núcleo urbano de Catarroja (Valencia). Los resultados obtenidos se podrán extrapolar a todas las especies que presenten características similares en cuanto al medio de propagación de los ultrasonidos.

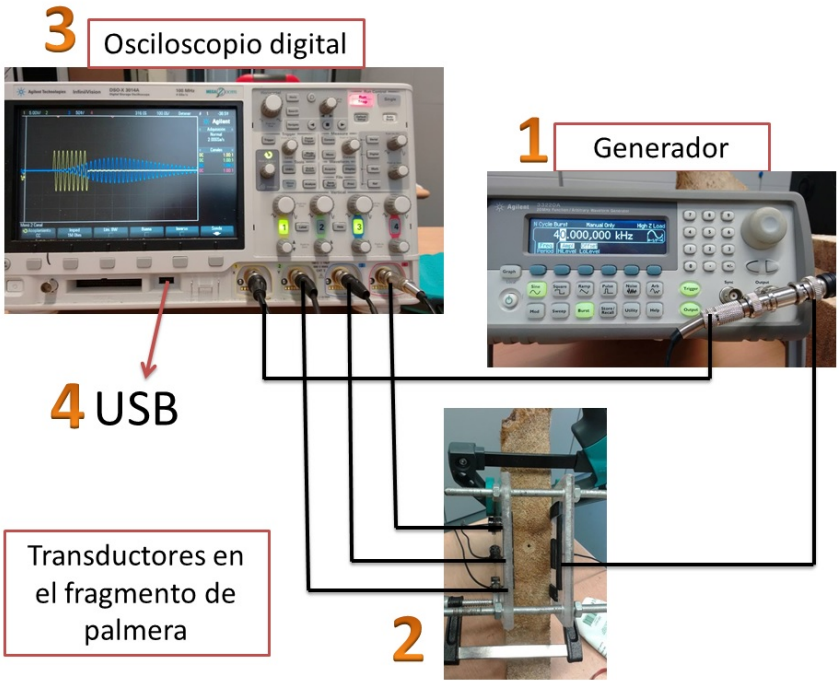



**Figura 1**. Esquema del equipo experimental.

El equipo experimental, esquematizado en la Figura 1, consta de un generador Agilent 33220A emitiendo con una frecuencia de 40 kHz con una tensión de 10 V. Se han utilizado cuatro transductores; uno de los cuales conectado al generador emitiendo 8 pulsos ultrasónicos a propagar a través de la palmera y, por otro lado, los otros tres transductores actuando como receptores recogiendo la señal recibida al otro lado de la palmera. Todas las señales son representadas en el osciloscopio digital (Agilent Technologies, DSO-X-3014A) a través de sus cuatro canales. La señal emitida se presenta en una escala de 5 V en la pantalla mientras que las distintas señales recibidas se registraron en la escala de 5 mV.

Para la sujeción de los transductores se ha ideado un sistema, esquematizado en la Figura 2, formado por dos planchas de metacrilato sujetas por unos tornillos de 1 cm de diámetro de forma que siempre se encuentran paralelas y a la misma altura, permitiendo cambiar la distancia entre ambas placas según convenga pero sin que una pueda moverse verticalmente respecto a la otra. Una de las placas lleva incorporado un único transductor que actuará como emisor mientras que en la otra plancha se encuentran los tres transductores que actúan como receptores. Las planchas pueden presentar dos disposiciones según cual sea la colocación de los tornillos: Así se consigue que la posición de los receptores respecto al transductor emisor sea enfrentada o al tresbolillo. De esta forma, usando las dos disposiciones y colocando siempre el emisor en el mismo punto, se permite realizar un barrido completo de la palmera respecto a la altura establecida con el punto de emisión. Para evitar posibles roturas de los transductores, en ambas planchas se han colocado pequeños fragmentos de un material elástico evitando que el transductor soporte compresiones excesivas.

Para favorecer la adaptación de impedancias entre el transductor y el medio se coloca una capa de gel (Transonic Gel) en cada uno de los transductores de forma previa a la colocación del dispositivo de sujeción en la palmera, repitiéndose esta operación cada vez que se necesita emitir una nueva señal. Además, para asegurar que la presión de los transductores sobre las palmeras sea lo más homogénea y estable posible, en cada medida se utilizan dos gatos de sujeción a cada lado de las planchas.

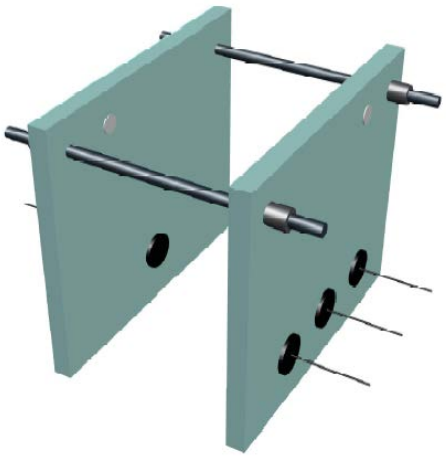


**Figura 2**. Modelo del aparato de sujeción de los transductores.

El ensayo se estructuró en varias pruebas. En primer lugar se estudió la propagación de la señal ultrasónica a través del material vegetal, sin orificio, en estado de total sequedad. Se realizó un barrido de la zona central de la palmera evitando bordes en los que podía haberse dado reflexiones y problemas asociados con la heterogeneidad del material. Se realizaron, por tanto, 4 tipos de medidas a través estas dos variables. Una vez realizada esta caracterización se repitieron las distinta mediciones, pero con la presencia de un orificio de 10 mm centrado

respecto al transductor emisor, para comprobar el efecto en los distintos parámetros a analizar en las señales recibidas al encontrarse con un obstáculo (aire) entre el tejido de la palmera, respecto a las medidas realizadas sin el mismo. Las galerías se realizaron de forma artificial con un taladro utilizando distintas brocas según la prueba. Así mismo, todas estas medidas se han hecho de forma idéntica en varios fragmentos de diferentes palmeras realizando aproximadamente 100 medidas. Por completitud, se han cogido otros fragmentos de palmera con las mismas características que los anteriores y siguiendo el mismo protocolo, se realizaron las medidas sin orificio y con orificio de 1, 5 y 10 mm efectuando 10 repeticiones en cada uno de los casos

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se han basado en la comparación de las amplitudes de las señales recibidas y en la forma de las envolventes. Comparando las medidas del mismo fragmento de palmera en el mismo punto de medida, se puede comprobar, en prácticamente el 100% de los casos, que la amplitud máxima de la envolvente de la señal registrada por el transductor central (gráficamente expresado de color rojo) disminuye de forma considerable cuando hay presencia de orificio en la palmera respecto a la medida con medio homogéneo (sin galería). Fig. 4.

La amplitud registrada en el transductor centrado es mayor que la detectada en los transductores laterales en la mayoría de puntos cuando se mide –a modo de control- en la madera sin orificios. Sin embargo dicha amplitud registrada en el transductor centrado (rojo) es comparable o menor que la detectada en los transductores verde y azul (transductores laterales) en la mayoría de puntos una vez se practica el orificio. Esto informa de la existencia de una “sombra” que impide que llegue la señal por el canal centrado. En efecto, en las medidas efectuadas en los mismos puntos pero sin orificio, se aprecia que la amplitud de señal centrada es mayor a las laterales contiguas por un factor de un valor de entre 2’5 y 3’5. Esta disminución en la amplitud se visualiza más en unas medidas que en otras. Esta variabilidad, se debe, por un lado a la dificultad en lograr en todos los ensayos la exactitud en la posición del transductor emisor respecto de la situación de la galería, y por otro, a la variación de presión a la que están sometidas las placas y por tanto los transductores. No obstante, a mayor o menor escala, la disminución de la amplitud ocurre en la totalidad de los casos. Para facilitar la comparación entre medicas –con y sin orificio- valoraremos el parámetro directividad (D) expresado como la relación entre la amplitud de señal ($A_{t\ central}$) y la media de las amplitudes de las señales registradas por los transductores laterales ($A_{t\ lateral}$); obteniéndose la amplitud en todos los casos a partir de la integración de los respectivos registros temporales. La ventaja que ofrece esta directividad, es que resulta independiente en gran medida de la configuración concreta del dispositivo en cada medida.

$$D = \frac{A_{t.\ central}}{\left(\frac{A_{t.\ lateral\ 1} + A_{t.\ lateral\ 2}}{2}\right)}$$

La directividad en las medidas efectuadas con presencia del orificio en la palmera siempre es menor respecto a las medidas sin él. En algunos casos, además, la directividad llega a ser menor que 1 en las medidas con presencia de orificio, lo que significa que la amplitud de la señal del transductor central disminuye de forma que llega a ser menor que la recibida por los transductores laterales. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas donde se aprecia este fenómeno.

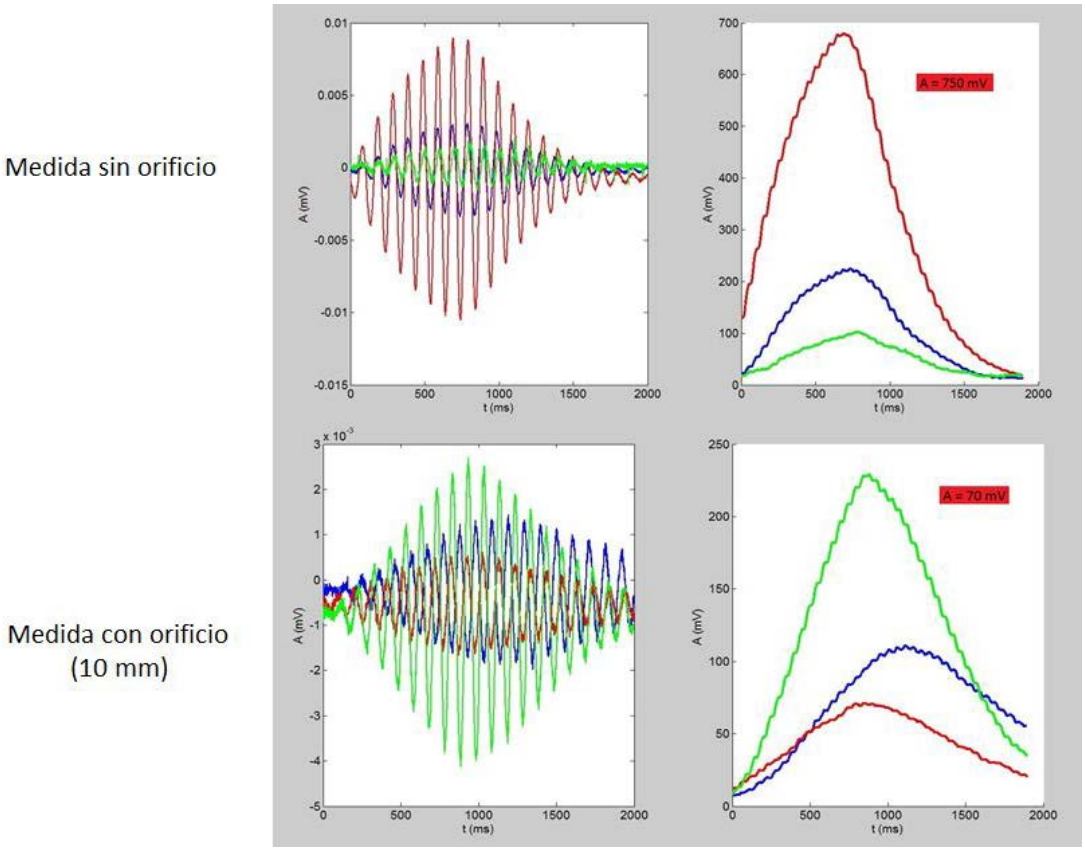



**Figura 4**. Comparación amplitud recibida por el transductor receptor central (señal roja) en dos medidas en el mismo fragmento de palmera sin y con orificio de 10 mm de diámetro.

Cuando la disposición de los transductores con respecto al orificio es tal que la sombra de este no es directamente proyectada sobre alguno de los transductores, la directividad no arroja datos concluyentes. En esos casos la detección de los orificios se asocia a la presencia de ecos en el registro temporal de la señal. Estos ecos se deben a que los cambios significativos de la impedancia del medio generan reflexiones, de modo que la energía “traza distintos caminos”, con distintos tiempos. Este fenómeno se puede comprobar gráficamente a través de la forma de la envolvente con la visualización de dos picos de señal debido a dicho retardo. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de las medidas registradas donde se aprecia la presencia de ecos.

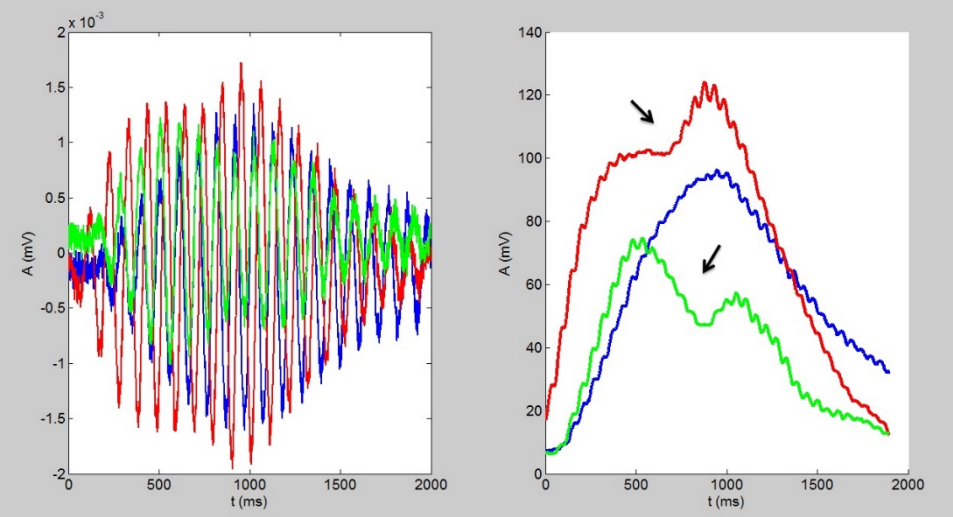



**Figura 5**. Ecos recibidos en palmeras con presencia de orificios.

A la vista de estos resultados, por tanto, se puede afirmar que la técnica de ultrasonidos si es capaz de detectar la presencia de las galerías en los fragmentos de palmeras utilizados a través de los dos fenómenos: la disminución de la amplitud y la presencia de ecos.
Cuando la galería se encuentra justo en el centro de la trayectoria de propagación de la señal emitida, debido al efecto sombra que genera el obstáculo, se puede detectar su presencia a través de la disminución de la amplitud pudiéndose incluso encontrar amplitudes menores en el transductor central que en los laterales (en el caso de que el orificio tape completamente la trayectoria entre los transductores emisor y receptor central). Sin embargo, si la galería no está completamente centrada y sólo obstaculiza parcialmente sigue habiendo una disminución de la amplitud, si bien la presencia de la galería se detecta con mayor claridad a partir de la forma de la envolvente a través de la presencia de ecos.

Para simular los primeros estados de ataque de la plaga del picudo rojo, momento óptimo para su control, se han practicado orificios con un diámetro de 1 mm. En este caso el efecto de sombra es prácticamente inapreciable, debido tanto al propio tamaño del transductor (que nunca recibe una sombra completa) como al aumento del efecto de difracción asociado a la disminución del obstáculo. No obstante, a través del estudio temporal de la señal, se aprecian ecos debidos al retardo de la energía reflejada similares a los observados con orificios de mayor diámetro Figura 6.

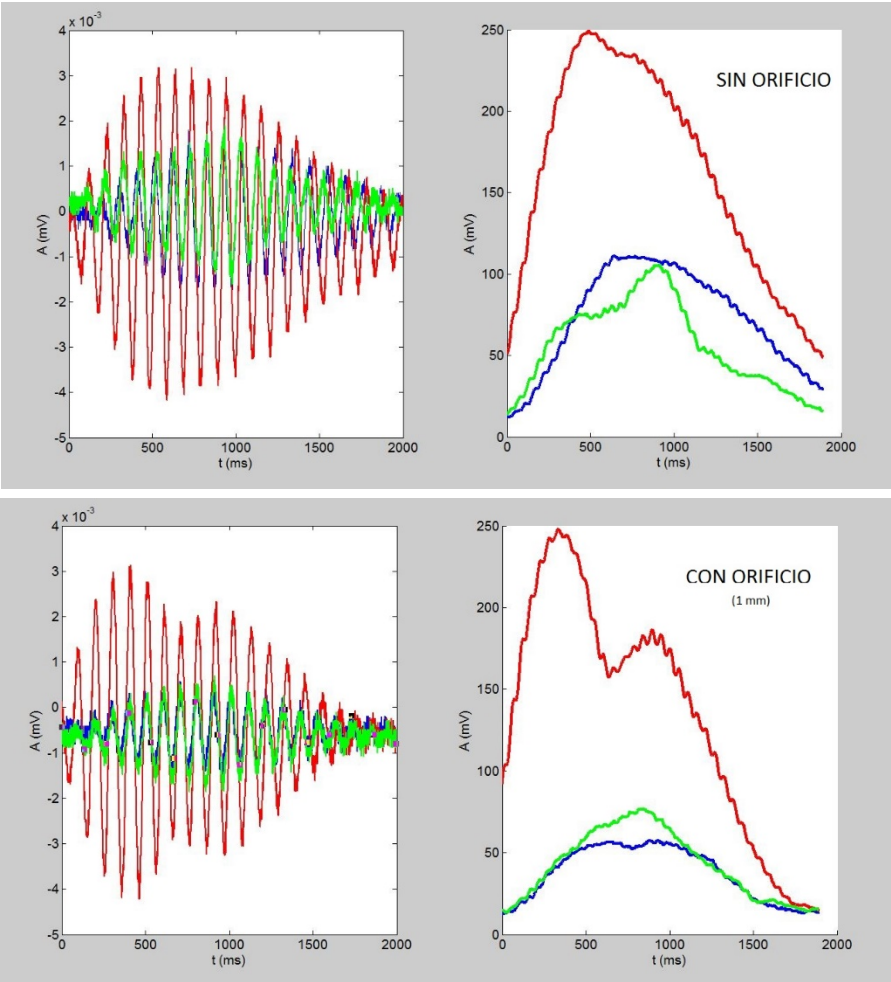



**Figura 6.** Señal recibida en fragmento de palmera sin y con orificio de 1 mm de diámetro.

Hay que tener en cuenta que el método es muy sensible a las características del transductor, y si cambia su factor de calidad o su frecuencia de resonancia hay cambios significativos que podrían malinterpretarse. También es muy sensible a parámetros de montaje, presión, punto exacto de contacto, cantidad de gel, etc. Queda claro que el método permite la detección de galerías, en las condiciones estudiadas en laboratorio. Queda ahora, definir un protocolo que permita detectarlas en situ. Este último paso es el que posibilitará llevar el método al éxito.

Por último, en las medidas realizadas con fragmentos de palmeras de 30 cm de espesor, el doble que en las pruebas anteriores, no se ha podido obtener ninguna conclusión puesto que la señal recibida ha sido prácticamente nula al haber demasiada atenuación en el medio. Para la correcta realización de estas medidas será necesario, por tanto, disponer de un amplificador de potencia conectado al generador para que se pueda recibir una correcta señal que se pueda trabajar con ella. En el presente estudio no se han podido realizar estas medidas con éxito al no disponer de un dispositivo de amplificación válido para el ensayo experimental.

## CONCLUSIONES

La técnica de ultrasonidos permite detectar galerías internas en el tejido vegetal de las palmeras del género *Phoenix*, en condiciones de laboratorio, con total sequedad del material vegetal y propagación de las ondas emitidas por un medio bastante homogéneo. Esta afirmación se puede dar como válida para los espesores de palmera ensayados de 15 cm necesitando de una mayor potencia del generador a través del uso de un amplificador para poder medir en espesores mayores.

La amplitud de la onda transmitida a través del tejido vegetal, así como la directividad del haz, son altamente dependientes de las condiciones de acoplamiento entre transductor y tejido. Condiciones que son muy difícilmente reproducibles (presión exacta, espesor de la capa de gel, distribución irregular de los haces de fibras, deformaciones permanentes del tejido por presiones ejercidas en experimentos anteriores, etc). No obstante los parámetros que se infieren de la distribución temporal de la señal así como de la comparativa entre distintos transductores de una misma medida resultan ser mucho más independientes de la configuración particular de cada medida; y por esta razón se ha basado en ellos el estudio. En el estado actual de la investigación, las condiciones del estudio en el laboratorio distan aún demasiado de las condiciones de un estudio in situ con material vivo. Es por ello que, si bien la técnica es conceptualmente válida, es pronto para concluir que su extrapolación a los casos reales pueda llevarse con éxito

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, L., DÍEZ, M.R., CASADO, M., 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a Pinus pinaster. *Universidad de Huelva*. 7-26

AGUSTÍ, M., 2010. *Fruticultura*. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 507 pp.

CABELLO, T., 2006. Biología y dinámica de población del picudo rojo de la palmera, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier, 1790) (Coleoptera: Dryophothoridae) en España. *I Jornada Internacional sobre el Picudo Rojo de las Palmeras*. *Fund. Agroalimed/Gen. Valenciana. Valencia., 1*: 19-34.

MAESTRE, J.F., SALCEDO, F., ALARCÓN, J.J., SOTO-GARCÍA, M., 2015. Aplicación de ultrasonidos para el control de algas en aguas regeneradas almacenadas en balsas de riego. *Actas del XXXIII Congreso Nacional de Riegos*.

MAGRAMA, 2015. *Avance del Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del 2014*, visto el 1 de Julio del 2015. http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistic

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# MULTILAYER DESIGN OF ACOUSTIC SENSORS FOR DARK MATTER BUBBLE CHAMBER DETECTORS

PACS: 43.38.+n; 95.35.+d; 43.58.+z; 43.60.+d.

I. Felis*; M. Ardid; J. Ferrer; J. A. Martínez-Mora
Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres (IGIC)
Universitat Politècnica de València (UPV),
C/ Paranimf, nº1, 46730, Gandia (València), (+34) 96 387 70 00.
*E-Mail: ivfeen@upv.es

## ABSTRACT

PICO Collaboration is using bubble chamber detectors searching for Dark Matter. The detector uses piezoelectric sensors in order to detect the acoustic signal emitted by the bubbles that are created within the superheated fluid when a nuclear recoil is produced therein. These sensors are attached on the outer wall of the vessel containing the superheated fluid. Thus, the design of the acoustic matching by interposing a layer of material between the glass of the vessel and the ceramic is critical. A method of characterization, optimization and design of such piezoelectric sensors is presented through a transmission acoustic multilayer model contrasted by experimental, analytical and numerical methods.

## RESUMEN

Los detectores de cámaras de burbujas para materia oscura de la Colaboración PICO utilizan sensores piezoeléctricos para la detección de la señal acústica emitida por las burbujas que se crean en el seno de un fluido sobrecalentado cuando se produce un retroceso nuclear. Dichos sensores están pegados en el exterior de las paredes de la vasija que contiene el fluido sobrecalentado, de modo que el diseño de la adaptación acústica entre el cristal de la vasija y la cerámica, mediante una capa intermedia, es crucial. Se presenta un método de caracterización, optimización y diseño de dichos sensores piezoeléctricos a través de un modelo de transmisión acústica multicapa contrastado experimental, analíticamente y numéricamente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto FPA2012-37528-C02-02 y Multidark (CSD2009-00064), y por la Generalitat Valenciana ACOMP/2015/175. Gracias a los miembros de la Colaboración PICO por su ayuda y aportaciones.

## INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas de la UPV colabora con el detector PICO en la caracterización y optimización de sensores piezoeléctricos que captan la señal acústica generada por el crecimiento de burbujas en un líquido sobrecalentado, generadas por la interacción de partículas con los núcleos de dicho fluido [1]. Esta vía de detección de partículas se emplea para la detección de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMP – Weakly Interacting Massive Particles) propuestas como candidatos para explicar la materia oscura. En la Figura 1 se muestra una fotografía de la versión de 30 litros del detector PICO que utiliza como fluido sobrecalentado $CF_3I$ en donde se han generado burbujas en su interior al detectar un neutrón, así como la ubicación de los sensores piezoeléctricos pegados a las paredes de la vasija.

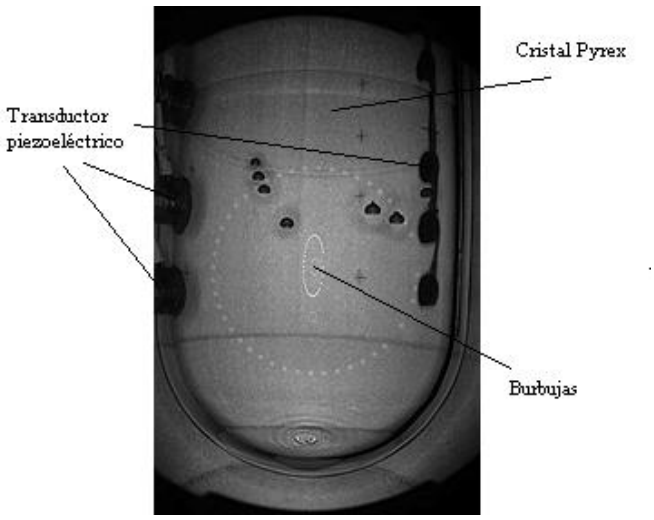



*Figure 1. Photography of PICO-60 detector (30 litros de $CF_3I$) in one of the detected events.*

La señal acústica que se genera en el crecimiento de una burbuja en un fluido sobrecalentado ha sido estudiada teórica y experimentalmente, obteniendo una señal cuyo ancho de banda oscila desde muy baja frecuencia, desde unos pocos Hz hasta unos 200 kHz.

El diseño general de transductores piezoeléctricos receptores consta de una serie de pasos que van desde la elección de la cerámica adecuada para las necesidades concretas hasta la optimización de los tipos y dimensiones de capas de adaptación de impedancias (matching layers) entre el medio desde el que se recibe hasta el propio piezoeléctrico, así como el añadir una masa posterior (backing) para ampliar el ancho de banda [2]. No obstante, una característica con especial incidencia en el desarrollo de sensores para PICO es que el medio de interés se encuentra en el interior de una vasija en cuya parte externa de sus paredes se sitúan pegados los detectores. Entonces, una vez establecido el tipo de cerámica más adecuada, tenemos que optimizar la transmisión acústica entre el fluido sobrecalentado y la propia cerámica, con la restricción de que ya se dispone de un medio intermedio (la pared de la vasija) cuyas propiedades no podemos modificar. Con ello, el objetivo de este trabajo es desarrollar un método para optimizar la capa de adaptación adicional para aumentar la sensibilidad de los transductores piezoeléctricos en un determinado rango de frecuencias. Con este fin se han realizado diferentes configuraciones de medida para dos tipos de transductores piezoeléctricos de forma que se pueda apreciar cómo varía la sensibilidad de estos en función de la configuración de capas interpuestas entre la vasija y el piezoeléctrico (variando longitudes del ML, formas, materiales, etc.). También se comparan los resultados experimentales con diferentes modelos teóricos de transmisión, partiendo del caso sencillo, pero no menos importante, de una única capa de adaptación, ampliándolo a un número cualquiera de ellas.

.

## MODELOS DE TRANMISIÓN ACÚSTICA

### Modelo general: n-capas

El modelo en cuestión consiste en incorporar una o más capas entre la cara radiante/receptora del elemento piezoeléctrico y la carga acústica. Estas capas actúan como transformadores mecánicos con aumento de la carga mecánica en la interfase. Imponiendo las condiciones de continuidad de presión y velocidad de partícula en cada una de las interfases, y estableciendo las relaciones entre amplitudes adecuadas podemos obtener, finalmente, el coeficiente de transmisión acústica total. El esquema planteado para resolver este problema se muestra en la Figura 2.

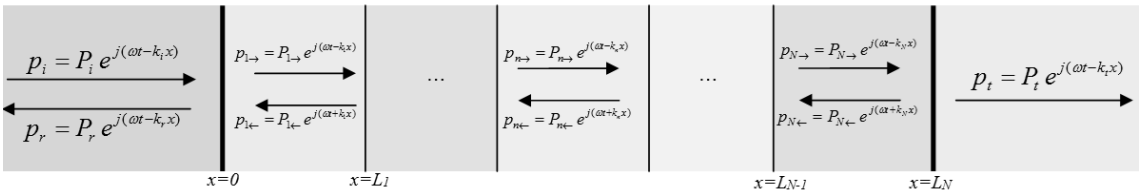



*Figura 2. Esquema para explicar el modelo de transmisión acústico a través de n capas*

Aquí se muestra únicamente los pasos necesarios para resolver el problema:

1º) calcular para la última capa N:

$$\frac{P_{N\rightarrow}}{P_{N\leftarrow}} = \frac{e^{2jk_N L_N}(Z_t + Z_N)}{Z_t - Z_N} \tag{1}$$

2º) para cada capa n, desde N-1 hasta 1:

$$\frac{P_{n\rightarrow}}{P_{n\leftarrow}} = \frac{e^{2jk_n L_n}\left(e^{2jk_{n+1}L_n}(Z_{n+1} - Z_n) + \frac{P_{n+1\rightarrow}}{P_{n+1\leftarrow}}(Z_{n+1} + Z_n)\right)}{e^{2jk_{n+1}L_n}(Z_{n+1} + Z_n) + \frac{P_{n+1\rightarrow}}{P_{n+1\leftarrow}}(Z_{n+1} - Z_n)} \tag{2}$$

3º) el coeficiente de reflexión queda:

$$R = \frac{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}}(Z_1 - Z_i) + Z_1 + Z_i}{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}}(Z_1 + Z_i) + Z_1 - Z_i} \tag{3}$$

4º) el coeficiente de transmisión de intensidad acústica valdrá:

$$T_I = 1 - R_I = 1 - |R|^2 \tag{4}$$

A pesar de la generalidad de este modelo, en este estudio nos interesa el caso particular de dos capas: una primera capa de 2,2 mm de espesor de cristal pyrex, que no puede variar, y una segunda capa cuyo material y dimensiones son elegibles a conveniencia. En las siguientes secciones se muestran las distintas configuraciones analizadas y la implementación de dicho modelo, así como su contraste con medidas experimentales.

### Caso particular: transmisión a través de una capa

Un caso previo y de especial interés es el de la transmisión de un sistema formado por dos medios semi-infinitos entre los que se ubica una capa de material distinto a los anteriores con un espesor $L$ determinado, tal como se puede ver en la Figura 5. Esta disposición está ampliamente estudiada [3] obteniéndose el siguiente coeficiente de transmisión de intensidad:

$$T_I = \frac{4}{2 + (Z_t/Z_i + Z_i/Z_t)\cos^2(k_1 L) + (Z_1^2/Z_i Z_t + Z_i Z_t/Z_1^2)\sin^2(k_1 L)} \tag{5}$$

Puesto que se conocen la impedancia acústica del medio donde se genera la señal acústica ($Z_i$) y del medio donde se recibe la señal ($Z_t$), cumpliéndose que $Z_i < Z_t$, se puede visualizar el comportamiento de esta expresión en función de los parámetros que conciernen a la capa intermedia ($Z_1, k_1, L$). El comportamiento del coeficiente de transmisión se muestra en la Figura 3 en la que se muestra el comportamiento del coeficiente de transmisión para algunas relaciones concretas entre $Z_i$, $Z_1$ y $Z_t$.

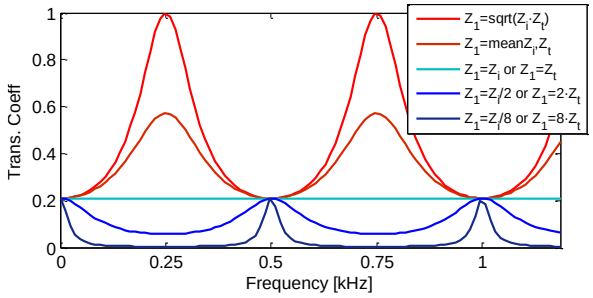



*Figura 3. Coeficiente de transmisión unicapa para distintas relaciones de impedancias entre los medios*

Se observa que la mayor transmisión se obtiene cuando la impedancia acústica características de la capa intermedia cumple $Z_i < Z_1 < Z_t$ cuando $Z_1 = \sqrt{Z_i \cdot Z_t}$ y para una relación entre su espesor y su número de onda $L = \lambda_1/4n = c_1/4fn = \pi/2k_1 n, n\ impar$ [2]. Éste es el caso entre el cristal pyrex y una cerámica cuando interponemos una capa de aluminio entre ambos, o bien entre el agua y la cerámica cuando únicamente está el cristal pyrex como capa intermedia. Si $Z_1 < \min\{Z_i, Z_t\}$ ó $Z_1 > \max\{Z_i, Z_t\}$ se obtienen máximos de transmisión mucho menores.

En la siguiente sección se implementa la ecuación (5) para obtener la frecuencia de máxima transmisión esperada para cada una de las capas de adaptación interpuestas entre el agua y cada una de las cerámicas piezoeléctricas, y compararemos los resultados con las medidas experimentales.

**Caso particular: transmisión a través de una interfaz plana**

Este caso corresponde al que se produce cuando la onda incide en el propio transductor, sin la incorporación de una capa de adaptación (Figura 4), dando cuenta de la pérdida inherente que se produce al tener el sensor libre en el propio medio. La solución a este caso particular está nuevamente ampliamente recogida en la bibliografía [3]. El coeficiente de transmisión de intensidad acústica que resulta según la nomenclatura utilizada aquí es:

$$T_I = \frac{4\, Z_2/Z_1}{(Z_2/Z_1 + 1)^2} \tag{6}$$

Mediante esta ecuación obtenemos un coeficiente de transmisión esperado ($T_I \sim 0{,}26$) entre una interfase de dos medios agua ($Z_i \sim 1{,}5 MRayls$) – cerámica ($Z_t \sim 20 MRayls$), como las que se utilizan en este trabajo.

## MONTAJES EXPERIMENTALES

**Configuración 0:** Trata únicamente de los piezoeléctricos libres medidos en agua, es decir, de acuerdo con la transmisión a través de una interfase agua-cerámica (ninguna capa). Se han empleado dos tipos de cerámicas piezoeléctricas blandas PIC 255 de la compañía PICeramics, unas tipo disco Ø25mm h2mm y otras tipo cilindro Ø10mm h5mm. La elección de estas cerámicas radica en que son semejantes a las ya utilizadas en los detectores PICO-2L y PICO-60, pues tienen un reducido tamaño para poder embeberlas en un encapsulado y presentan elevadas sensibilidades en frecuencias entre 50 kHz y 150 kHz.

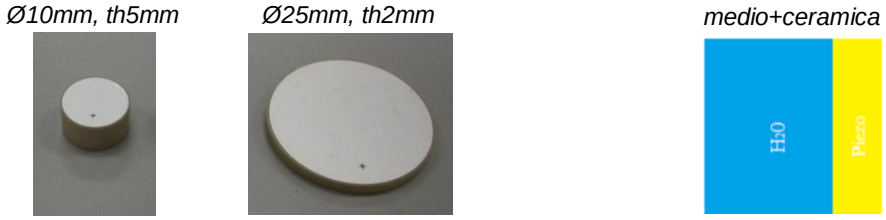



*Figura 4. A la izquierda, imagen de las dos cerámicas utilizadas. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.*

**Configuración 1:** Similar a la configuración 0 pero añadiendo la capa intemperada (los diferentes ML) pegados al piezoeléctrico, es decir, transmisión a través de 1 capa. Tal como se ha visto, en una primera aproximación, nos interesa que la impedancia de la capa de adaptación se encuentre entre la del pyrex ($Z_i{\sim}11{,}0 MRayls$) y la del piezo ($Z_i{\sim}18{,}4 MRayls$), o sea entorno $Z_1 = \sqrt{11{,}0 \cdot 18{,}4} = 14{,}2\ Mrayls$. Por este motivo se ha decidido utilizar un **ML de aluminio** ($Z_1 = 17{,}2\ Mrayls$), pues además de cumplir bastante bien esta condición, es un material accesible, y no presenta tanta atenuación como otros metales que también cumplen la condición, como el plomo o el estaño [6].




*Figura 5. A la izquierda, imagen de dos de las cerámicas utilizadas pegadas a un ML. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.*

**Configuración 2:** Similar a la configuración 1 pero con el ML pegado a las paredes de una vasija de test de 2,2 mm de cristal pyrex, es decir, semejante a un modelo de transmisión a través de 2 capas.




*Figura 6. A la izquierda, imagen de todas las cerámicas con ML pegadas a la pared de una vasija de cristal pyrex. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.*

### Caracterización de los materiales

El cristal pyrex, el aluminio y el piezoeléctrico se han caracterizado convenientemente para obtener la densidad, velocidad de propagación e impedancia, tal como se muestra en la Tabla 1. Estos serán los valores que tomaremos para la implementación del modelo teórico.

| Elemento | c [m/s] | ρ [kg/m$^3$] | $Z_C$ [MRayls] |
|---|---|---|---|
| **Agua** | 1500 | 1000 | 1,5 |
| **Cristal Pyrex** | 4939 ± 23 | 2230 | 11,01 ± 0,06 |
| **ML Aluminio** | 6335 ± 36 | 2747 ± 13 | 17,41 ± 0,19 |
| **PIC 255** | 2381 ± 40 | 7719 ±160 | 18,37 ± 0,69 |
| **Aire** | 343 | 1,29 | 0,442 |

*Tabla 1. Propiedades medidas de los materiales a emplear*

La Tabla 2 muestra las dimensiones de los ML utilizados para nuestro estudio. Dichas dimensiones provienen de un estudio inicial para maximizar la transmisión en las frecuencias de resonancia de las cerámicas sueltas de modo que el espesor del ML corresponda con la cuarta parte de la longitud de onda de dicho modo.

| **Dimensiones ML de aluminio** | | | |
|---|---|---|---|
| **Cerámica** | **Nombre** | **Espesor [mm]** | **Ø [mm]** |
| **PIC 255 Ø10mm h5mm** | C1 | 7,7 | 10 |
| | C2 | 8,9 | 10 |
| | C3 | 16,1 | 10 |
| | C4 | 21,5 | 10 |
| | C5 | 23,8 | 10 |
| | C6 | 31,1 | 10 |
| **PIC 255 Ø25mm h2mm** | D1 | 15 | 25 |
| | D2 | 20 | 25 |
| | D3 | 25 | 25 |
| | D4 | 30 | 25 |

### Caracterización de los transductores

El modelo de transmisión se ha contrastado con las medidas de sensibilidad de los transductores en las diferentes configuraciones. Ésta ha sido obtenida, en el caso de las configuraciones 0 y 1, situando los transductores en el interior de un tanque de agua, mientras que en la configuración 2, los transductores ya están pegadas a la vasija llena de agua. Todas las medidas se controlan con el sistema de adquisición y generación PXI-1031 y las señales están postprocesadas en Matlab para una correcta distinción entre las emitidas y recibidas [4].

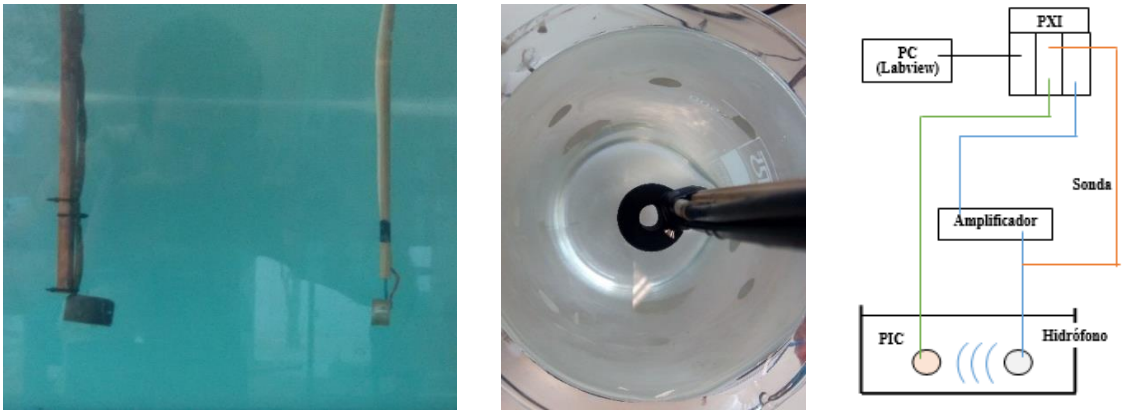



*Figura 7. Caracterización de los transductores. A la izquierda, imagen de la calibración en las configuraciones 0 y 1 (emisor FFR x30 de referencia). En el medio, caracterización de la configuración 2 (emisor FFR x60 de referencia). A la derecha, esquema del montaje para el control de medidas.*

## RESULTADOS: COMPORTAMIENTO DE LA SENSIBILIDAD

**Configuración 0:** la Figura 8 muestra la sensibilidad obtenidas para cada cerámica. Únicamente aparecen las que se disponían libres (C3-C6 y D2-D4). Para el resto de cerámicas se ha utilizado una extrapolación de los siguientes resultados.

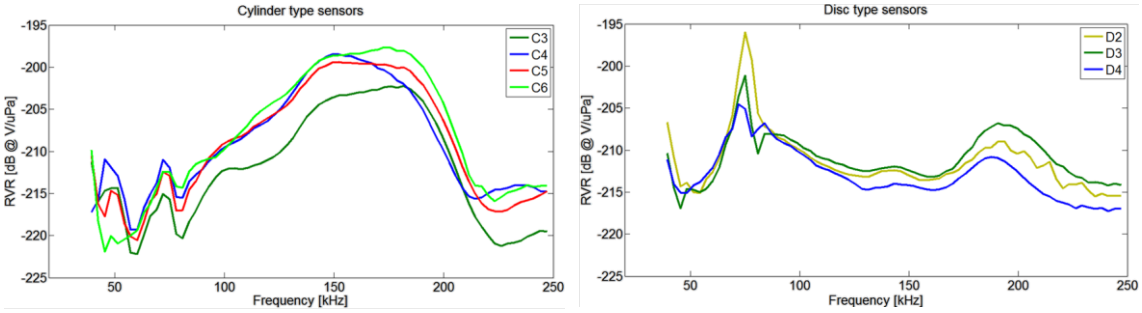



*Figura 8. Sensibilidades en recepción de las cerámicas cilindro libres.*

**Configuración 1:** La figura 9 muestra la sensibilidad obtenida para cada uno de los transductores al incorporar el ML. Para una mayor comprensión del comportamiento, mostramos la diferencia entre las sensibilidades con ML y sin ML.

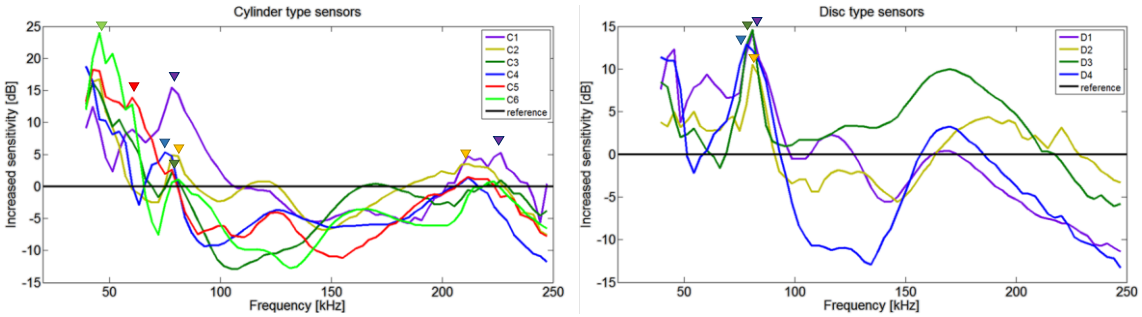



*Figura 9. Diferencia de sensibilidad de las cerámicas al incorporar el ML.*

En general, la sensibilidad aumenta en todos los ML en frecuencias inferiores a 100 kHz (C1), 60 kHz (C2) y 80 kHz (C3 – C6) para los cilindros, e inferiores a 220 kHz (D3) y 100 kHz (D1, D2, D4) para los discos. Hemos señalado los picos de sensibilidad (▼) que utilizaremos para contrastar con el modelo teórico de una capa (5), tal como se muestra en la Figura 11.

**Configuración 2:** La Figura 10 muestra la diferencia de sensibilidades entre las cerámicas con ML pegadas a la vasija y la correspondiente a dicha cerámica suelta sin ML.

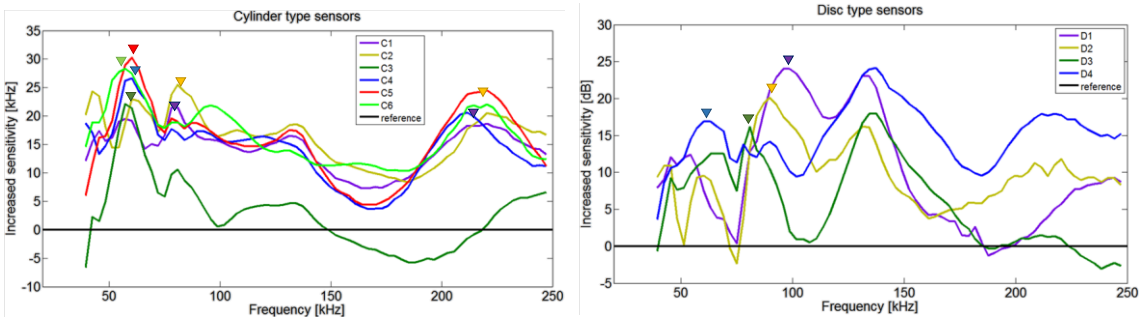



*Figura 10. Diferencia de sensibilidad de las cerámicas con ML pegadas a la vasija.*

La sensibilidad ha aumentado en prácticamente todos los transductores y todo el rango frecuencial (a excepción del C3 que podría tener algún problema de pegado). En el caso de la cerámica tipo cilindro, el incremento es de entre 10 dB y 25 dB, y las sensibilidades son parecidas entre ellas. En el caso de cerámicas tipo disco, el incremento es más variable pero destacamos el transductor D4 como el más sensible. Además, destacamos los picos señalados de sensibilidad (▼) para posteriormente contrastar con el modelo teórico de dos capas comentado anteriormente. El resultado se muestra en la Figura 15.

## RESULTADOS: CONTRASTE CON MODELO TEÓRICO

La siguiente Figura 11 reúne las posiciones frecuencias de cada pico de sensibilidad, que hemos cogido de las Figuras 9 y 10, para cada espesor de ML de la configuración 1 (izquierda) y de la configuración 2 (derecha). Los círculos (●) coresponden a las sensibilidades de transductores tipo cilindro, mientras que las cruces (x) a los tipo disco. Además, en colores vemos los resultados teóricos obtenidos teniendo en cuenta los valores medios de los materiales (líneas sólidas) así como sus incertidumbres (sombreados) que hemos mostrado en la Tabla 1.

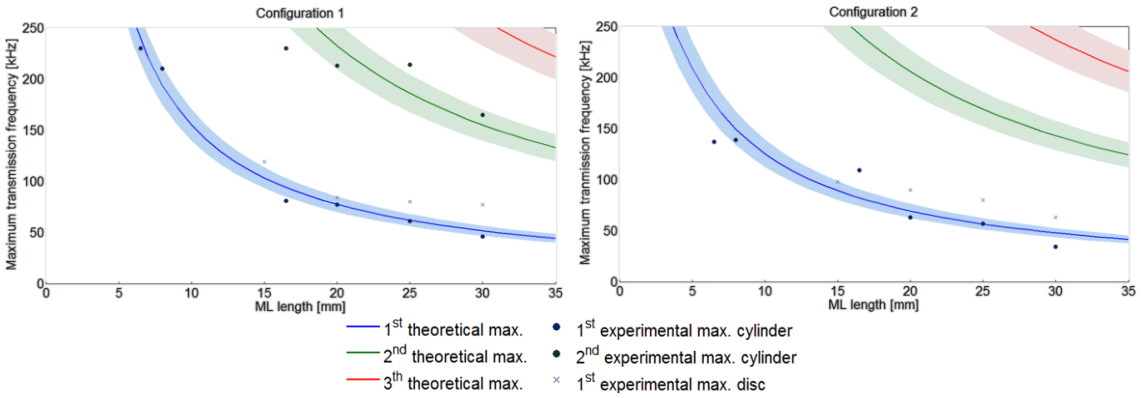



*Figura 11. Frecuencias de máxima transmisión acústica vs. espesor de la capa intermedia de aluminio según el modelo de transmisión de una capa (izda.) y de dos capa (dcha.). Contraste con frecuencias de máxima sensibilidad (RVR) para los distintos ML que se han estudiado experimentales.*

**Configuración 1:** respecto a las cerámicas con geometría cilindro, el primer máximo frecuencial (azul) se aproximan bastante bien a los valores esperados, con desviaciones inferiores al 5 % respecto a la curva teórica. En el caso del segundo máximo frecuencial (verde), aunque se trata de cada vez frecuencias más elevadas y de menor interés para nuestros propósitos, la dispersión de los valores es mayor pero se puede apreciar cierta tendencia de los datos con respecto a la curva teórica. En el caso de las cerámicas tipo disco, las primeras resonancias son en general un poco mayores al valor esperado y la tendencia no es tan clara como en el caso anterior. Esto puede deberse a que las máximas frecuencias esperadas están próximas a la frecuencia de resonancia de la cerámica libre, por lo que es más difícil de discernir un aumento en su proximidades. Aun así, existe un aumento de la transmisión acústica en estas frecuencias, que mejora la sensibilidad de estos transductores en estas bajas frecuencias, de mayor interés.

**Configuración 2:** la incorporación de la capa de 2,2 mm de pyrex afecta sobretodo a los ML de tamaños pequeños, reduciendo las frecuencias de máxima transmisión, es decir, para el mismo espesor de ML se tiene ahora menores frecuencias de resonancia que en el caso con solamente ML. Esto era de esperar dado que se está añadiendo masa, y tamaño al sistema. A partir de 20 mm de espesor de ML, el efecto del cristal pyrex es prácticamente despreciable respecto de los resultados obtenidos en la configuración 1. Contrastando con resultados experimentales, el aumento de sensibilidad no ha sido tan claro dado que los picos no eran tan prominentes como antes. Aun así, en el caso de cerámicas tipo cilindro los resultados se acercan al modelo teórico aunque algunos valores se desvían un poco como es el caso del ML de 7,7 mm i del 16,1 mm. En el caso de las cerámicas tipo disco las frecuencias siguen siendo de nuevo mayores a las esperadas pero sí se observa cierto aumento frecuencial para espesores menores, tal como se esperaba.

## REFERENCIAS


[1] C.Amole, et al. *Dark Matter Search Results from the PICO-2L C3F8 Bubble Chamber*. Physical Review Letters. **114**, 231302 (2015).

[2] A.Arnau. *Piezoelectric Transducers and Applications*. 2nd ed. Srpinger (2008).

[3] L.E.Kinsler. *Fundamentals of acoustics*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. (2000).

[4] S.Adrián, et al. *Acoustic signal detection through the cross-correlation method*. Ad-hoc Networks and Wireless, pp.66-79 (2015).

[5] M.Bou, I.Felis, M.Ardid. *Acoustic studies for alpha background rejection in dark matter bubble chambers detectors*. Low Radioactivity Techniques 2013. **1549**, pp.142-147. (2013).

[6] I.Felis, M.Bou, M.Ardid. *Tecnologías acústicas para la detección de Materia Oscura*. XXXIV Bienal de Física. Real Sociedad Española de Física (2013).

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS
AND AMBISONICS

# TRANSDUCTOR ULTRASONICO DE POTENCIA PARA CAMARAS DE TRATAMIENTO CON CAMPO ACUSTICO ESTACIONARIO DE ALTA INTENSIDAD

PACS: 43.38+n

V.M. Acosta[1], J .Bon[2], A.Pinto[1], E. Riera[1]
[1] Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC.
Serrano 144, E28006 Madrid, Spain
[2] Food Technology Department Universitat Poliècnica de Valencia
E46022 Valencia, Spain
E-mail: vm.acosta@csic.es

## ABSTRACT

This work describes the methodology used in the design and development of a piezoelectric transducer with flat rectangular-plate radiator and piston like radiation. The directive radiation is achieved by steps reflectors. The emitter and reflectors are placed in a cavity where high sound pressure levels are achieved in a standing wave field. This way enough energy is stored to enhance the kinetic of the drying process. For this purpose, a power transducer with a piezoelectric vibrator and a flat flexural vibrating plate has been designed and optimized. The power capacity of the transmitter is given by the volume of the ceramic stack, by the fatigue strength of the vibrating plate and by the operation stability at the working frequency. It is also important to avoid coupling with another untuned modes and to avoid heating in the stack ceramic and in the critical plate-vibrator coupling zone. Therefore, strict design criteria are required that can ensure a stable response of the transducer under power operation without producing fails or fatigue cracks at ultrasonic frequencies.

## RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología utilizada en el diseño y desarrollo de un transductor piezoeléctrico de placa rectangular plana con radiación tipo pistón. La radiación directiva se consigue mediante reflectores escalonados. El emisor y los reflectores se colocan en una cavidad donde se consigue alcanzar altos niveles de presión sonora al crear un campo estacionario. De ésta forma, se consigue almacenar energía suficiente para acelerar la cinética del proceso de secado. Se ha diseñado y optimizado un transductor, constituido por un vibrador piezoeléctrico y una placa plana vibrando a flexión. La capacidad de potencia del emisor, viene dada por el volumen de las cerámicas, la resistencia a fatiga de la placa vibrante y la estabilidad de funcionamiento a la frecuencia de trabajo. Además es importante evitar el acoplamiento con otros modos no deseados, calentamientos en el bloque de cerámicas y en la zona crítica de acoplamiento placa-vibrador. Para ello se requieren aplicar criterios de diseño muy estrictos. Así se puede asegurar un funcionamiento estable del transductor, sin llegar a provocar fallos o grietas de fatiga a frecuencias ultrasónicas.

## INTRODUCION

En la práctica es difícil alcanzar un diseño, construcción y montaje perfectos de un transductor piezoeléctrico. Los síntomas de un diseño o montaje defectuoso se manifiestan a través de la aparición de ruidos, calentamientos locales y variaciones de parámetros tales como la impedancia acústica, ancho de banda o incluso el rendimiento. El desacoplo de piezas por defectos de mecanizado o por pérdidas de tensión mecánica en los tornillos, roces entre las piezas o incluso la aparición de microgrietas en los materiales puede ser consecuencia de un montaje en el que no se ha llevado a cabo un control riguroso de los materiales utilizados, del proceso de fabricación o del montaje del conjunto.

Los principales criterios de diseño para un correcto funcionamiento del transductor, son: 1) frecuencia de resonancia del transductor, próxima a la frecuencia de resonancia de la placa radiante. 2) correcta posición de los nodos en las superficies de fijación. 3) máxima amplitud de desplazamiento en la boca del amplificador mecánico. 4) separación de otros modos propios cercanos al modo de trabajo, ya sean modos propios de la placa, del vibrador o de cualquiera de sus componentes. El emisor que se presenta en este trabajo está constituido básicamente por un vibrador tipo sándwich, un amplificador mecánico (AM) de la vibración, y una placa radiante con superficie extensa. Estos elementos están acoplados mecánicamente uno a continuación del otro, de manera que la vibración generada por el elemento transductor y el AM excite la placa radiante en uno de sus modos flexionales de vibración.
Para el diseño numérico de los transductores se aplica el método de los elementos finitos (FEM), usando el código comercial COMSOL Multiphysics v 5.1 [1] válido para el acoplamiento multifísico de la piezoelectricidad, componentes estructurales y modelización de campo acústico lineal. Previamente se realiza una primera aproximación de algunos de sus componentes mediante un cálculo analítico. La caracterización de las propiedades mecánicas del material de la placa radiante y de cada uno de los componentes estructurales que forman el transductor es muy importante si se quiere obtener mayor precisión en el cálculo numérico y una óptima validación experimental. Para ello se utilizan técnicas de evaluación no destructiva, midiendo las velocidades de propagación de ondas acústicas longitudinales y transversales en cada uno de los 3 ejes (X, Y, Z) dentro del sólido. Posteriormente se determinan analíticamente las propiedades ortotrópicas del material.

## DISEÑO ANALITICO DEL TRANSDUCTOR

Como datos de partida en el diseño del transductor se lleva a cabo un cálculo analítico del sándwich para obtener las dimensiones aproximadas de la masa y contramasa [2]. También se puede realizar un cálculo analítico del AM para determinar las longitudes en función del diámetro [3]. Para el diseño de la placa radiante se comienza por una primera aproximación de las dimensiones de la placa vibrante fijando la frecuencia en función del proceso. Se usan las ecuaciones de placa plana rectangular de extremos libres [4, 5] para determinar el resto de las dimensiones para el número de líneas nodales que se desea.

En general el vibrador que excita la placa se diseña considerando que actúa como una barra axisimétrica compuesta por diferentes materiales vibrando libremente en un modo extensional con modos resonantes múltiplos enteros de λ/2, donde λ representa la longitud de onda. El AM se diseña para resonar a λ/2, actuando como amplificador del movimiento vibratorio del extremo radiante del sándwich con una sección mayor, conectada al sándwich y una sección menor conectada a la placa vibrante. La unión entre las dos secciones tiene un radio de curvatura para disminuir las tensiones en la transición [3]. A éste transductor se le ha añadido otro λ/2 en la parte delgada con el fin de alargar el AM sin modificar su factor de amplificación para que el vibrador no interfiera en la radiación de los reflectores.

## PLACA RADIANTE

La placa radiante es uno de los componentes más importantes ya que condiciona la máxima capacidad de potencia del transductor, y su geometría determina la focalización o direccionalidad del campo acústico radiado según las necesidades requeridas en la aplicación. La direccionalidad del emisor, hasta ahora se ha conseguido mediante placas de perfil escalonado y biescalonado. Con un nuevo diseño de emisor ultrasónico con placa plana y reflectores escalonados [6] se obtiene una alta direccionalidad de forma más económica y sencilla, aprovechando además las dos caras radiantes de la placa. El objetivo es poner en fase la radiación emitida de todas las zonas de vibración de la placa. Se obtienen mediante un análisis modal realizado con FEM todos los modos próximos a la frecuencia de resonancia deseada. Seguidamente se busca el modo de vibración flexional con 12 líneas nodales transversales paralelas al lado corto. Su geometría y materiales vienen condicionados por la aplicación; frecuencia requerida para el proceso, capacidad de potencia y distribución de campo acústico. La distribución de desplazamientos de una placa plana es bastante homogénea como se observa en la figura 1a.

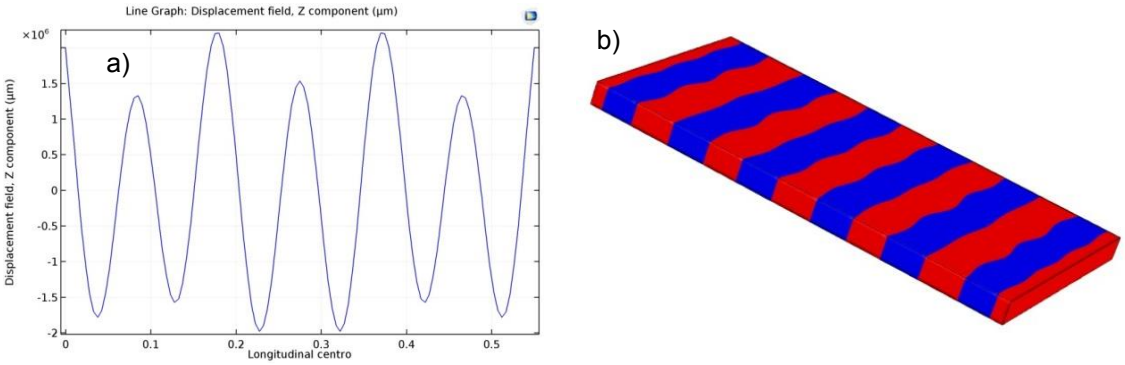



*Fig. 1.- a) Distribución de desplazamientos y b) fase de la placa plana*.

En la figura 1 se muestra la distribución de desplazamientos de la placa vibrante, así como la fase de vibración. Se observa la homogeneidad de su distribución de desplazamientos. Una vez realizado el análisis modal y determinada la frecuencia de resonancia del modo deseado, se realiza un cálculo de la máxima capacidad de potencia de la placa [7], mediante un análisis armónico a la frecuencia de trabajo aplicando una carga de desplazamiento perpendicular a la superficie radiante en cualquier punto de la placa. La capacidad de potencia quedará limitada por la resistencia máxima a la fatiga ultrasónica del material [8].

## CERAMICAS PIEZOELECTRICAS PZT802

Las cerámicas constituyen el corazón del vibrador ultrasónico al ser el componente en el que la energía eléctrica de excitación se transforma en energía mecánica de vibración. Las propiedades más importantes que deben reunir éstas cerámicas son: alto factor de calidad mecánico (Qm > 1000), y temperatura máxima de trabajo de 100ºC. No es recomendable sobrepasar los 70ºC para trabajo en continuo a fin de garantizar una larga vida útil. Las cerámicas envejecen bajo el efecto de la presión y de la temperatura acelerándose el proceso si el efecto de ambas se conjunta. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el pre-stress al que debe estar sometido el stack de cerámicas, y que debe ser de entre 25 MPa y 30 MPa, mientras que la tensión dinámica máxima recomendada es de 20 MPa. Las tolerancias geométricas de paralelismo deben ajustarse a las normas USA: DOD-STD-1376A (SH). Para las cerámicas estándar: Hasta ∅ 50 mm se permite un defecto máximo de paralelismo inferior o igual a 0,03 mm. Hasta ∅ 100 mm se permite un defecto máximo de paralelismo inferior o igual a ≤ 0,06 mm. Actualmente se utilizan cerámicas compuestas por Titanato Zirconato de Plomo,

de bajas pérdidas mecánicas y eléctricas, cuya denominación comercial es: Morgan Matroc Electroceramics MM PZT8 $\varnothing_{ext}$ 38 x $\varnothing_{int}$ 13 x 6,35. En general para la modelización numérica de las cerámicas sus propiedades electro-mecánicas son obtenidas directamente de los valores de catálogo del fabricante. Aunque existe una dispersión en las propiedades electro-mecánicas del material, debidos a su falta de homogeneidad, el error que se obtiene mediante el cálculo en el análisis dinámico del transductor completo es despreciable con respecto a la variabilidad producida por la carga dinámica del resto de los componentes metálicos del dispositivo vibrante. La figura 2 muestra la comparación de la respuesta dinámica entre la medida experimental de una cerámica PZT802 con un Analizador de Impedancias HP 4191A y los resultados obtenidos del modelo 3D mediante el cálculo numérico usando un modelo sin pérdidas y con los valores de catálogo.

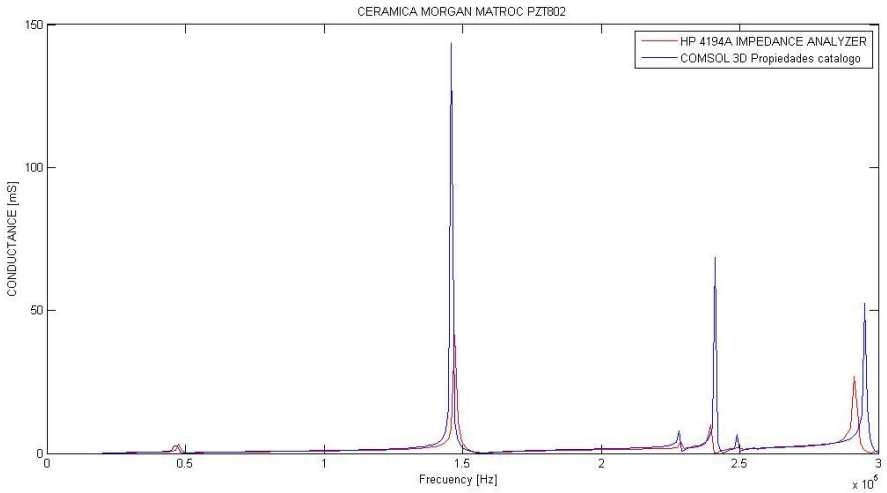



*Fig 2.- Validación numérico-experimental modelo piezoelectricidad.*

En la figura 3 se muestra la deformación en el modo “thickness” de un anillo piezoeléctrico, y la influencia de sus otras dimensiones en la deformación del modo espesor.

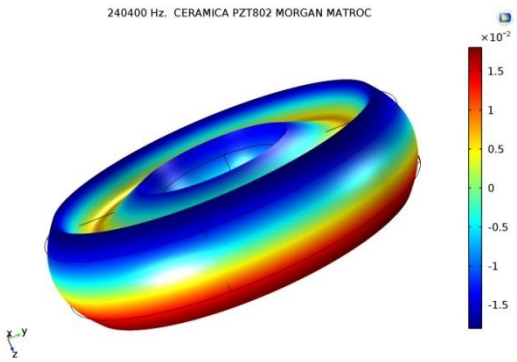



*Fig 3.- Distribución desplazamientos y deformación de un anillo cerámico PZT802 en su modo “thickness”*

## SANDWICH PIEZOELÉCTRICO

El sándwich o elemento de transducción consiste en cuatro cerámicas piezoeléctricas en paralelo, colocadas dos a dos con las polaridades en direcciones opuestas y separadas por unos terminales eléctricos. Los elementos piezoeléctricos con sus terminales van acoplados mecánicamente a dos cilindros de acero inoxidable, la masa y la contramasa, constituyendo el

sándwich piezoeléctrico. Todos estos elementos van unidos entre sí por medio de un tornillo central que además conecta eléctricamente la masa y la contramasa, pero que está aislado mediante un casquillo de teflón de las cerámicas piezoeléctricas y de los terminales eléctricos, fig. 4.

El volumen de las cerámicas viene determinado por tres factores: Limites eléctricos [9], mecánicos y térmicos [10]. El límite eléctrico viene principalmente limitado por el campo eléctrico que es posible aplicar a la cerámica, la máxima energía que puede almacenar, y el factor de acoplamiento electromecánico $K_{33}$. El límite mecánico está determinado por la máxima tensión mecánica que deben soportar las cerámicas dentro de su límite elástico. Para las cerámicas del tipo PZT-8 éste valor es del orden de 20 MPa. El límite térmico está determinado por el punto de Curie (temperatura a la cual la cerámica pierde sus propiedades piezoeléctricas, es decir, se despolariza). Por ello, se recomienda que no exceda el rango 70 – 120ºC en función del tipo de cerámica. Mediante FEM también se puede realizar un análisis estático aplicando un pretensado en las cerámicas de 250 kg/cm$^2$ [4]. El pretensado tiene como fin incrementar la resistencia a la fatiga, mejorar el acoplamiento entre las fases y disminuir las pérdidas mecánicas y la impedancia eléctrica. A continuación, se realiza un análisis modal para la obtención de la frecuencia de resonancia del sándwich piezoeléctrico, que servirá de validación durante el proceso de montaje del sándwich.

## VIBRADOR ULTRASONICO

El vibrador mostrado en la figura 5 está constituido por el sándwich piezoeléctrico y un amplificador mecánico (AM) que consiste en una barra metálica cilíndrica con dos tramos múltiplos de lambda/4 de longitud y de distinta sección cuya transición tiene un determinado radio de curvatura. La sección mayor es igual a la de los cilindros del elemento de transducción. La transformación de amplitud viene dada por la razón de las áreas de las dos secciones. Generalmente se trata de un elemento resonante a media longitud de onda cuyo objetivo es amplificar la vibración del elemento de transducción para obtener una elevada amplitud en el extremo en conexión con la placa radiante. En este transductor se le ha añadido otra media longitud de onda con el fin de alargar la longitud del vibrador, de tal modo que no interfiera en la radiación de la placa obstaculizando su transmisión a través de los reflectores. Se ha realizado un modelo por elementos finitos obteniendo la respuesta dinámica del vibrador, y se ha buscado su modo extensional donde se obtiene la mayor amplitud de desplazamiento en la punta.

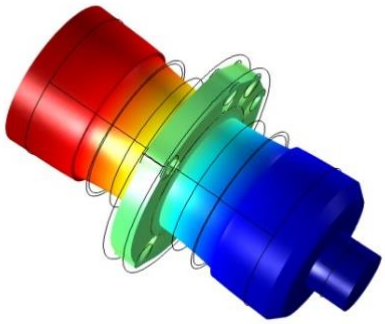


*Fig. 4.- Modo extensional de resonancia del sandwich*

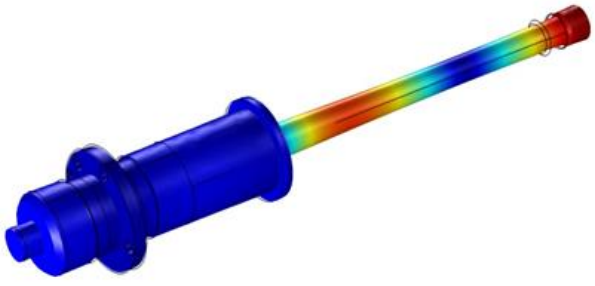


*Fig. 5.- Modo extensional de resonancia del vibrador*

En la figura 6 se muestra la distribución axial del AM de los modos de resonancia próximos a la frecuencia de trabajo. Destaca claramente la amplificación del modo extensional a la frecuencia de 22798 Hz correspondiendo a un factor de amplificación de 10.

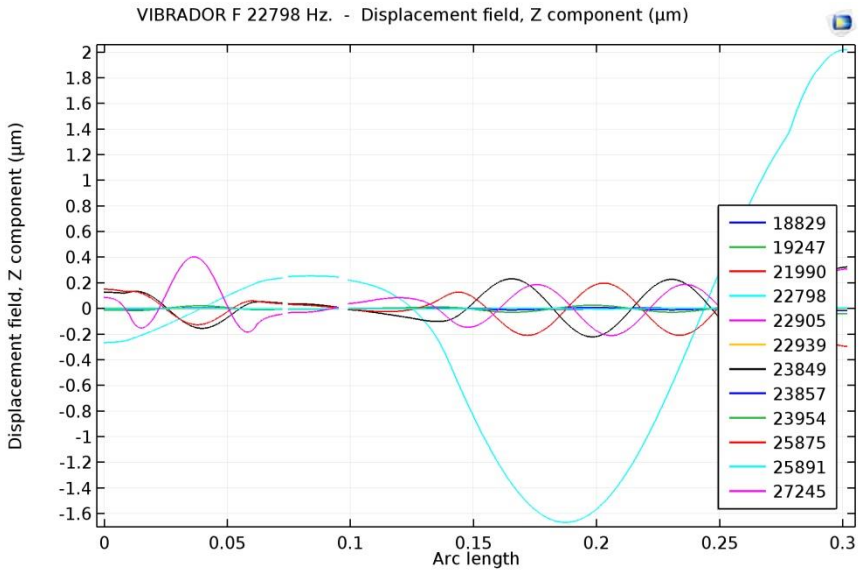



*Fig. 6.- Distribución de desplazamientos en diferentes modos propios de resonancia del vibrador. Cada linea representa el desplazamiento vs. la longitud de arco para cada frecuencia.*

## TRANSDUCTOR DE PLACA

Mantener la estabilidad de funcionamiento de un transductor de potencia requiere un diseño y ajuste complejo debido al elevado número de modos de resonancia presentes en la estructura. Para ello es necesario modelizar la estructura completa en 3D y analizar minuciosamente los resultados del análisis dinámico obtenido en el cálculo numérico. Es importante alejar los modos propios de la estructura vibrante completa del modo de trabajo. Resonancias propias del terminal central (figura 7), modos de flexión, torsión y otros modos que se puedan excitar por cercanía al modo de trabajo. Es importante que los puntos donde se va a fijar el vibrador en la carcasa exterior del transductor coincidan con los nodos del vibrador, donde el desplazamiento es cero. Un desplazamiento en la posición de los nodos en el vibrador, provoca calentamientos y ruidos. La amplitud de desplazamiento en la boca del amplificador, así como en el centro de la placa debe ser máxima. La frecuencia de la placa debe ser muy próxima a la del transductor completo. La capacidad de potencia viene limitada por el material, así como de la distribución de desplazamientos que debe ser lo más homogénea posible en toda su superficie.

El punto más crítico que puede limitar la capacidad de potencia de la placa vibrante, es el acoplamiento entre la placa y el vibrador. El cambio de la vibración extensional en el vibrador, a flexional en la placa, implica un diseño óptimo de la conexión entre el amplificador mecánico y la placa, mediante modificaciones en el espesor de la arandela del tornillo de la placa, así como en los radios de curvatura de la arandela, del agujero y de la boca del AM con el fin de disminuir las tensiones mecánicas en el punto de conexión. Se deben minimizar las tensiones mecánicas en ésta zona, y dejar que la tensión máxima en el transductor esté localizada en la placa. Entonces será válido el cálculo de la capacidad de potencia estimado durante el diseño de la placa y se obtendrá la máxima potencia admisible de la placa radiante. Pero si durante su funcionamiento existe un acoplamiento de modos con una distribución de desplazamientos para la que no ha sido diseñado el transductor la placa se puede romper por fatiga. Para ello debemos analizar todos los modos de resonancia propios de la estructura, separando mediante modificaciones en la geometría los modos de resonancia cercanos a la frecuencia de trabajo, así como los modos cercanos a sus armónicos. Además hay que analizar las tensiones dinámicas en las cerámicas piezoeléctricas para la potencia nominal del transductor con el fin de minimizar los efectos no lineales de las cerámicas. En la figura8 se muestran las tensiones

estáticas tras el pretensado del sándwich de 25 MPa y las dinámicas para la máxima capacidad de potencia de la placa.

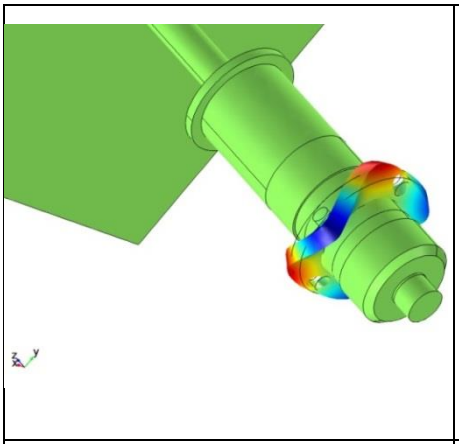


*Fig 7.- Modo de resonancia propio a flexión del terminal central del sandwich*

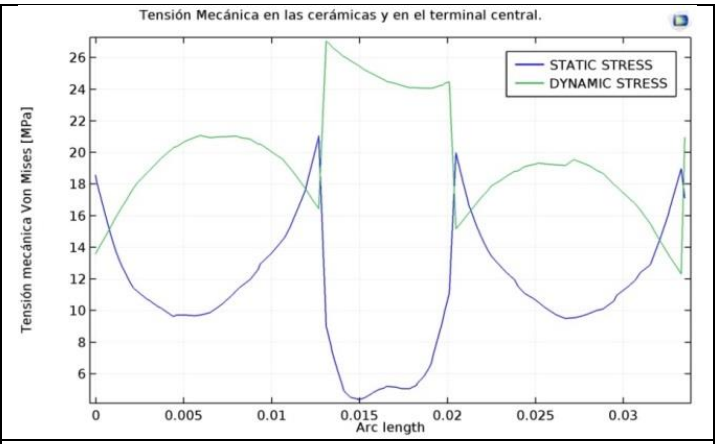



*Fig 8.- Comparación entre la distribución de las tensiones estáticas y dinámicas en las cerámicas (extremos de la gráfica) y el terminal central (centro de la gráfica)*

**CAMARA TRATAMIENTO**

Una vez diseñado el transductor, se modeliza la cámara de tratamiento con el fin de obtener la distribución de presión acústica en su interior, en éste caso con los reflectores a 45°. El elevado número de elementos de todos los componentes estructurales y piezoeléctricos más todo el volumen de aire de la cámara de tratamiento, donde se recomienda un tamaño máximo de elemento de diez veces la longitud de onda, implica decenas de millones de grados de libertad de varias físicas acopladas (estructura, piezoelectricidad, acústica). Por limitaciones de capacidad computacional debe simplificarse y modelizarse únicamente la placa ya diseñada dentro de la cámara. La influencia del volumen de aire modelizado en la respuesta dinámica del transductor es prácticamente despreciable, por lo que podemos de modelar su interacción con el vibrador. En la figura 9 se muestra la placa radiante dentro de la estructura de reflectores a 45º, así como la cámara de tratamiento donde se colocarán las bandejas con las muestras a deshidratar.

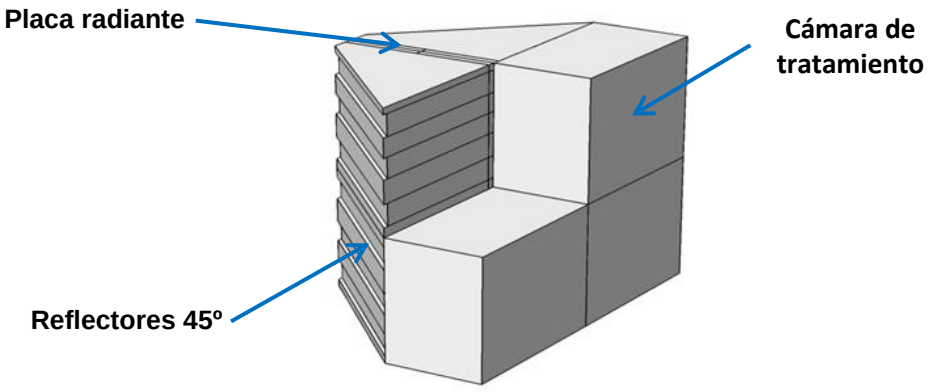



*Fig 9.- Geometría de la cámara de tratamiento y placa radiante*

En el cálculo del campo acústico se han obtenido valores promedios de nivel de presión sonora de 167 dB en el interior de la cámara (Figura 10). Actualmente se están realizando medidas de campo acústico para la validación de los resultados donde también queremos determinar empíricamente la atenuación no-lineal en el interior de la cámara [11].

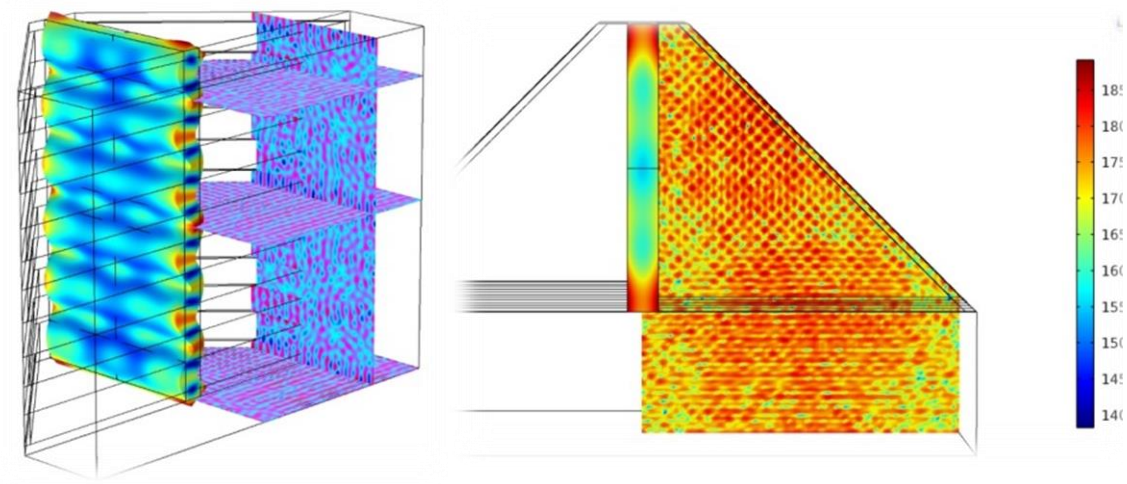


*Fig 10.- Distribución de presiones en el interior de la cámara.*

## COMENTARIOS FINALES

La realización de modelos mediante el método de los elementos finitos de físicas acopladas entre la piezoelectricidad, la parte estructural y su interacción con el medio fluido, es válido para el diseño de transductores piezoeléctricos de potencia. A pesar de las limitaciones computacionales podemos realizar simplificaciones que nos aproximen el cálculo numérico a los resultados experimentales. La modelización de efectos no lineales en las cerámicas piezoeléctricas con potencia y la no-linealidad del medio serían los siguientes pasos para una validación completa de éstos dispositivos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MINECO la financiación del proyecto del plan nacional DPI 2012 – 37466-C03-01 (USDIS)

## REFERENCIAS

[1] Users Guide COMSOL Multiphysics 5.1.
[2] Neppiras, E.A., 1973. *The prestressed piezoelectric sandwich transducer*, Ultrasonics International Conference Proceeding, 295-302.
[3] Beldford*, John F., 1960. The stepped horn*. Proceeding Natl. Electronics Conference. Chicago
[4] Leissa, Arthur, W., 1993. *Vibration of Plates*, Ohio State University
[5] Caldersmith, G.W *, 1984. Vibrations of orthotropic rectangular plates*, J. Acoustica 56, 144-152
[6] Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Riera-Franco de Sarabia, E., Vázquez-Martínez , F., Campos-Pozuelo, C., V.M. Acosta-Aparicio, V.M., 2002. *Recent developments in vibrating-plate macrosonic transducers.* Ultrasonics, 40 (1-8) 889-93.
[7] F. Vázquez M., G. Rodríguez C., C. Campos P., L.Elvira S., J.A. Gallego Juárez. *Nuevos avances en el desarrollo de transductores macrosónicos de placa escalonada.* Congreso Ibérico de Acústica, 14-16 Septiembre 1998, Lisboa. Libro de Comunicasoes, 387-390.
[8] Campos –Pozuelo, C., and Gallego-Juárez, J.A., 1996. *Limiting strain of metals subjected to high-intensity ultrasound*. Acta Acustica united with Acustica, 82, 823-828
[9] Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., 1973. *Análisis mediante circuito equivalente de un emisor ultrasonoro con placa vibrante.* Electrónica Física Aplicada, 16(4) 605-615.
[10] J. Van Randeraat R.E. Setterington *1974. Piezoelectric ceramics.* PHILIPS. Application book.
[11] Mednikov, E.P., 1965. *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols.* Consultants Bureau New York.

TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

# INFLUENCIA DE MICROPARTÍCULAS DE SILICIO EN HIFU

**PACS:** 43.35.Ty

JC.Melgarejo[1]; P.Candelas[2]; C. Rubio[2]; I.Rodriguez[3]; E.Aparisi[4]; A.Uris[2]
[1] *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU*
[2] *Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU*
[3] *Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU*
[4] *Hospital Francesc de Borja, Avinguda de la Medicina, 6, 46702 Gandia*

## ABSTRACT

For a decade, silicon microparticles have attracted the attention of the scientific community.

Currently, a large number of scientific advances are based on the use of microparticles as acting surfaces, vehicles, information systems, new materials or in biomedicine.

This report focuses on increasing the efficiency of the High Intensity Focused Ultrasound technique (HIFU) by using silicon microparticles, which are characterized by their good biocompatibility, the easy obtention in different sizes and shapes, as well as the easy functionalization.

## RESUMEN

Desde hace una década, las micropartículas de silicio han atraído la atención de la comunidad científica.

Actualmente, un importante número de avances científicos se fundamentan en la utilización de micropartículas cómo superficies de actuación, vehículos de transporte, sistemas de información, nuevos materiales o biomedicina.

Este trabajo se centra en mejorar la eficiencia de la técnica de Ultrasonidos Focalizados de Alta Intensidad (HIFU, High Intensity Focused Ultrasound) mediante micropartículas de silicio, las cuales están caracterizadas por su buena biocompatibilidad, su fácil obtención en múltiples tamaños y formas, así como su fácil funcionalización.

## INTRODUCCIÓN

El cáncer es una de las principales causas de muerte en las sociedades avanzadas, en concreto en la población española representa una incidencia de 210.000 casos nuevos al año,

equivalentes a 600 nuevos diagnósticos de cáncer diarios [1]. Casi el 50% de las muertes en personas de edad media se deben a esta patología [2], siendo este gran impacto social el que justifica la investigación y el desarrollo de nuevas formas de tratamiento.

Los avances tecnológicos han supuesto el desarrollo de nuevos dispositivos y de técnicas y procedimientos terapéuticos, constituyendo un conjunto de terapias denominadas "mínimamente invasivas o intervencionistas" permitiendo en algunos casos sustituir técnicas quirúrgicas complejas y complementar tratamientos farmacológicos con procedimientos poco agresivos para el paciente, aumentando la efectividad del tratamiento.

En el grupo de estas técnicas mínimamente invasivas se encuentran los ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU) que permiten la ablación de tumores sólidos de forma extracorpórea, o mediante abordaje intracavitario (transrectal, transvaginal).

Actualmente, las aplicaciones de HIFU más desarrolladas y con mayor experiencia clínica se encuentran en el tratamiento de tumores sólidos benignos como la hiperplasia benigna de próstata por vía transrectal y de tumores benignos de útero y mama. Entre las aplicaciones oncológicas se encuentra el tratamiento de tumores cancerígenos primarios o secundarios de hígado, mama, riñón, páncreas, sarcomas de tejido blando y óseo y tumores retroperitoneales [3, 4].

El HIFU consiste en la focalización de un haz de ultrasonidos de alta frecuencia en un volumen pequeño de tejido de forma extracorpórea o endocavitaria (figura 1).

Los ultrasonidos atraviesan de forma inocua tejidos blandos, y transportan suficiente energía para destruir de forma local los tejidos en los que se focaliza un haz de alta frecuencia. Los dos mecanismos por los cuales se produce la ablación térmica son el aumento directo de temperatura, debido a la acumulación de energía en el punto de focalización, y la cavitación. El primero induce necrosis coagulativa inmediata en el tejido en cuestión, al estar expuesto a una temperatura de entre unos 60ºC y 100ºC durante un segundo. El aumento de temperatura en los tejidos depende del coeficiente de absorción del tejido, del tamaño, forma y sensibilidad a la temperatura del área afectada. Los cambios biológicos causados por el calentamiento dependen del nivel de temperatura y de la duración de la exposición. Una "dosis térmica" que exceda cierto umbral causa coagulación tisular y conduce a un daño celular irreversible [4], tal y como se muestra en la figura 2.

El otro fenómeno físico causante de la ablación es la cavitación que se produce al gasificarse el agua intracelular en forma de microburbujas, que cuando entran en resonancia producen ondas de alta presión, destruyendo el tumor [5].

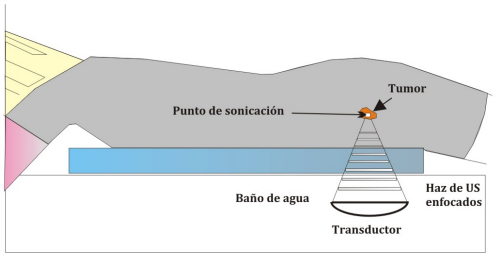



Figura 1. Técnica HIFU para ablación de tumores

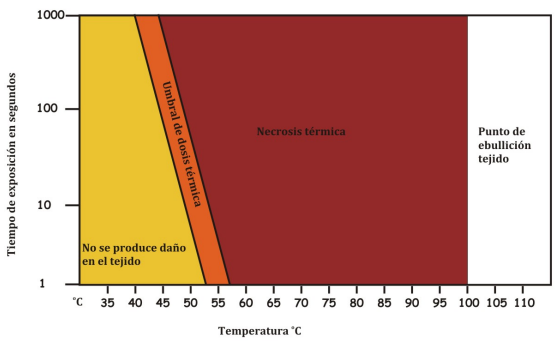



Figura 2. Alteración del tejido en función de la temperatura y del tiempo de exposición

En este trabajo se estudia la influencia de las micropartículas de silicio en el aumento de la temperatura.

**MONTAJE EXPERIMENTAL**

Se han realizado dos tipos de medidas sobre muestras de agar con micropartículas de diferentes tamaños, y para distintas concentraciones. Las muestras de agar se han obtenido calentando 500 ml. de agua destilada con 30 ml. de agar (solución al 6%).

Las micropartículas utilizadas han sido proporcionadas por distintos fabricantes: las de ~2 µm de diámetro son de ECUTEC, las de ~75 µm son de SILGRAIN, y las de ~100 µm son de FA.

Las concentraciones estudiadas han sido de 8 g/l (2 gramos de Si en 250ml de agar) y de 40 g/l (10 gramos de Si en 250ml de agar).

Para medir la velocidad de propagación de los ultrasonidos a través de las muestras se ha utilizado un Pulser-Receiver Panametrics 5072PR como fuente de ultrasonidos, dos transductores de ultrasonidos Olympus de 3,5 MHz, y un osciloscopio Teknotrix TDS1002B para visualizar la señal.

Se han realizado medidas de transmisión sobre un cilindro de 11mm de diámetro y 34,3 mm de longitud, obteniendose para cada caso el pulso de 3,5 MHz correspondiente, y calculándose la velocidad de propagación como el cociente entre la distancia que separa los transductores y el tiempo de vuelo del pulso.

Además se han realizado medidas de temperatura mediante termopares tipo K, con el sistema de adquisición de Cobra4 de Phywe (figura 3)

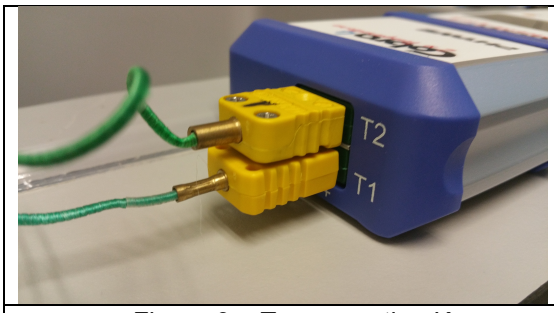



Figura 3a. Termopar tipo K




Figura 3b. Sistema Cobra4 de Phywe

Las medidas de temperatura se han realizado sobre muestras cilíndricas de 23mm de diámetro y 30mm de longitud (figura 4b) contenidas en un soporte de PVC, dispuestas tal y como muestra la figura 4a. El termopar sumergible se ha introducido en la zona focal, siendo su localización un aspecto crítico. Éste registra el aumento de temperatura debido a la aplicación de los ultrasonidos de alta intensidad mediante el transductor SU-102 de Sonic Concepts de 3,5 MHz. Se registraron datos durante 60 segundos, durante 30 de los cuales se aplicó HIFU a la muestra.

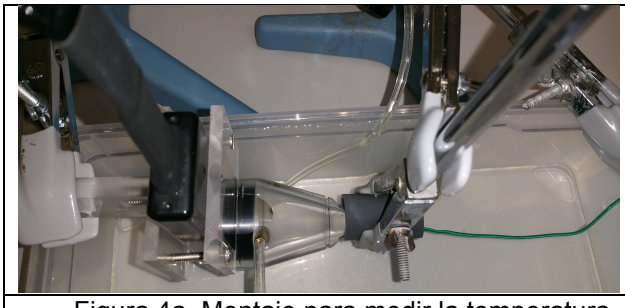


Figura 4a. Montaje para medir la temperatura



Figura 4b. Muestra de Agar con micropartículas de 75 µm

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

En primer lugar se han caracterizado acústicamente las muestras de agar, sin presencia de micropartículas, obteniéndose una velocidad de propagación de los ultrasonidos de 1429,16 m/s. Al introducir micropartículas en la solución, se aprecia una disminución de la velocidad, que depende del tamaño de la partícula y de la concentración utilizada. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

| | Diámetros de las micropartículas (µm) | | |
|---|---|---|---|
| Concentración (g/l) | ~2 | ~75 | ~100 |
| 8 | v=1395,44 m/s | v=1401,14 m/s | v=1426,78 m/s |
| 40 | v=1387,54 m/s | v=1363,27 m/s | v=1408,5 m/s |

Tabla1. Velocidad de propagación de los ultrasonidos en función del tamaño de las micropartículas y de la concentración de las mismas.

En la tabla se observa que la velocidad de propagación en cualquier solución de agar con presencia de micropartículas es menor que la velocidad en el agar. Además, al aumentar la concentración la velocidad disminuye. Por tanto, la onda permanece durante más tiempo en el material, lo que contribuye a un aumento de la temperatura.

A continuación se presentan las gráficas de temperatura que constatan la relación entre la temperatura y la concentración de micropartículas en la muestra. Se observa que al aumentar la cantidad de partículas en la solución, de 2 a 10 gramos, se consigue mayor temperatura en menor tiempo, independientemente del tamaño de partícula.

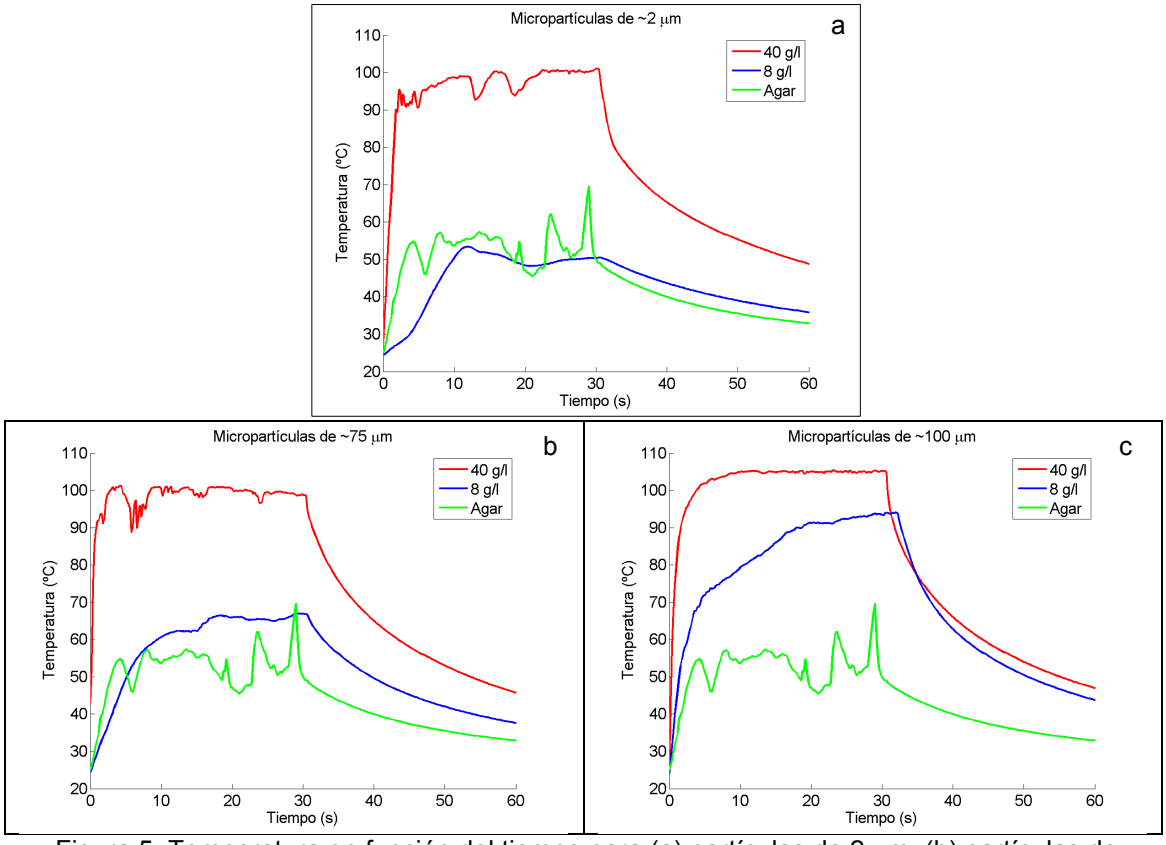



Figura 5. Temperatura en función del tiempo para (a) partículas de 2 µm, (b) partículas de 75 µm, (c) partículas de 100 µm

Independientemente del tamaño de las partículas, para una concentración de 40g/l se llegan a alcanzar temperaturas superiores a 95ºC en menos de 2,5 segundos, mientras que si la cancentración es de 8g/l, la temperatura máxima alcanzada es de 59ºC para el caso de partículas de 100 micras, alcanzándose tan solo 28ºC para las de 2 micras.

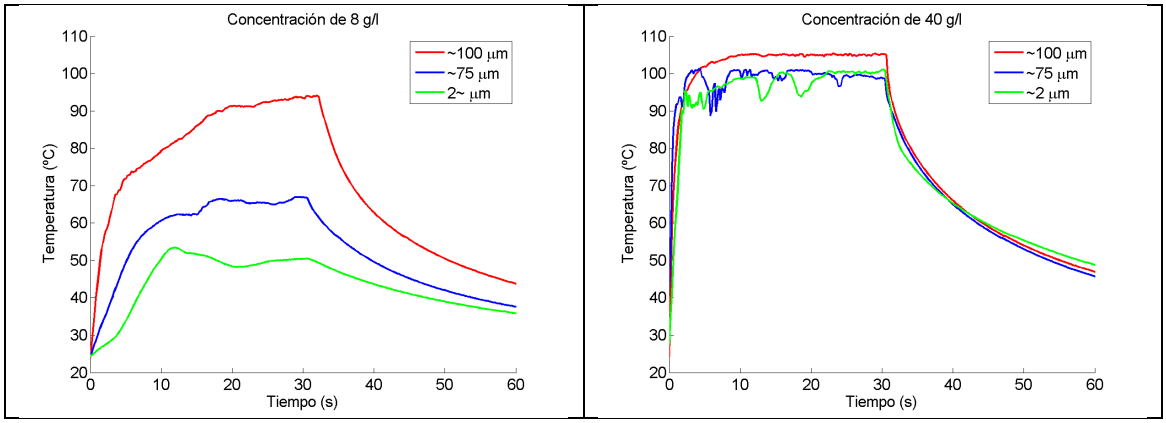



Figura 6. Temperatura en función del tiempo para (a) concentración de 8 g/l, (b) concentración de 40 g/l

Si la concentración es de 40g/l, la temperatura máxima alcanzada está en torno a 100ºC para cualquier tamaño de partícula, mientras que si la concentración es de 8g/l, el tamaño de la partícula influye considerablemente, alcanzándose temperaturas de 94ºC para partículas de 100 micras y tan solo 53ºC para las de 2 micras.

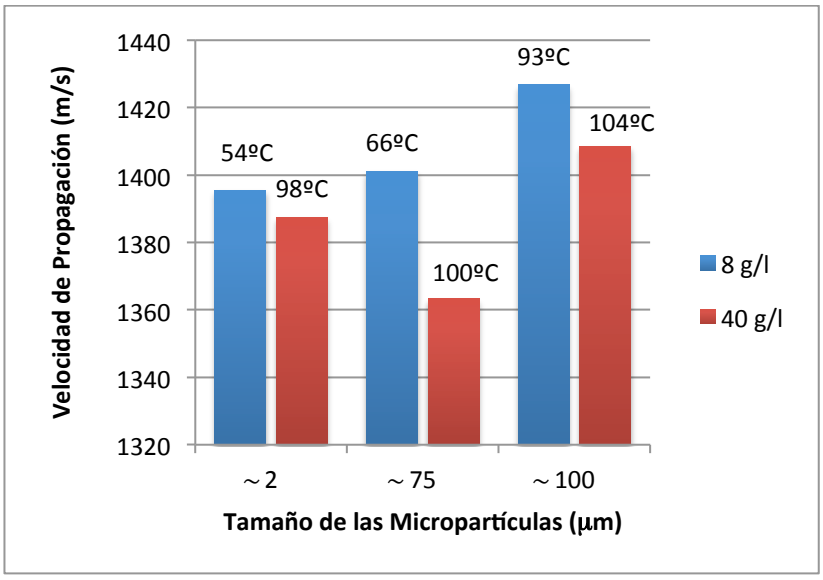



Figura 7. Velocidad de propagación en función de la concentración de micropartículas y su tamaño

## CONCLUSIONES

Los resultados anteriores parecen indicar que, si bien al introducir micropartículas en la solución de agar la velocidad de propagación del ultrasonido disminuye, permaneciendo más tiempo en el interior de la muestra, y que esto contribuye a aumentar su temperatura, no es ésta la causa principal del aumento. De ser así, habría una relación directa entre la temperatura alcanzada y la velocidad de propagación en la muestra, y sin embargo, determinados experimentos no lo corroboran. En este estudio, y debido a la posibilidad de formación de burbujas en la etapa de elaboración de la muestras, es posible que otros fenómenos como la cavitación contribuyan al aumento de temperatura.

Por otra parte, se ha constatado que para concentraciones de 10 gramos, independientemente del tamaño de las partículas, la temperatura alcanzada supera los 95 ºC, siendo ésta muy superior a la temperatura alcanzada en el agar, que oscila en torno a las 55ºC. A su vez, hay que destacar que las temperaturas máximas en presencia de micropartículas se alcanzan en muy poco tiempo, en menos de tres segundos.

Por último, en el ámbito de la biomedicina, y en concreto en la ablación de tumores mediante HIFU, es necesario reducir el tamaño de las partículas para su posible aplicación intravenosa, y su posterior eliminación. Como en este estudio se ha demostrado que es posible alcanzar altas temperaturas con las micropartículas de menor tamaño, utilizando la concentración adecuada, sería interesante estudiar si en el rango de las nanopartículas el comportamiento sería similar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la GVA- AICO/2015/119.
Agradecer la colaboración en esta investigación al “Institute of Cancer Research” de Londres.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] J.J.Cruz, presidente de la Sociedad Española de Oncología Médica (SEOM). XIV Congreso Nacional SEOM, Salamanca 2013.
[2] Karim-Kos HE de VE, Soerjomataram I, Lemmens V, Siesling S, Coebergh JW. Eur J Cancer; 44(10):1345-89 (2008)
[3] Kennedy J. Nat Rev Cancer; 5:321-7 (2005)
[4] Kennedy JE, Ter Haar GR, Cranston D. Br J Radiol; 76(909):590-9 (2003)
[5] CC Coussios, CH Farny et al. International Journal of Hyperthermia 23 (2), 105-120 (2007)

# ÍNDICE DE AUTORES


| | |
|---|---|
| Abad Toribio, Laura | AAM-0 007 |
| Abad Toribio, Laura | AAM-4 006 C.I. |
| Acosta, Víctor M. | ULT-0 001 C.I. |
| Acosta, Victor M. | ULT-0 004 C.I. |
| Acosta, Victor M. | ULT-0 017 C.I. |
| Aguilera, Emanuel | AFS-0 005 C.I. |
| Aguilera, Emanuel | AFS-1 011 C.I. |
| Alba Fernández, Jesús | AAM-0 013 |
| Alba Fernández, Jesús | AED-0 011 C.I. |
| Alba Fernández, Jesús | AED-2 002 C.I. |
| Alba Fernández, Jesús | AMS-0 002 C.I. |
| Alberdi, E. | ASL-0 024 C.I. |
| Aleixandre, Manuel | ULT-0 004 C.I. |
| Algarín Ojeda, Macarena | ASA-0 007 C.I. |
| Alías, Francesc | AAM-3 002 C.I. |
| Almeida Pinto, Paulo | AEV-0 008 |
| Alonso, A. | AED-1 006 C.I. |
| Alonso, Jesús | AAM-4 001 |
| Álvarez Rodenbeek, Juan Pablo | AAM-0 010 |
| Álvarez-Corbacho, A. | ASL-0 025 C.I. |
| Álvarez-Morales, L. | ASL-0 016 C.I. |
| Álvarez-Morales, L. | AED-1 006 C.I. |
| Amado-Mendes, Paulo | AED-2 006 |
| Amado-Mendes, Paulo | AEV-0 006 |
| Andrés, Roque R. | ULT-0 001 C.I. |
| Anthony, David K. | AED-4 001 C.I. |
| António, Julieta M. P. | AED-4 002 |
| Antoñanzas, Christian | AFS-1 008 C.I. |
| Antoñanzas, Christian | AFS-1 009 C.I. |
| Antunes, José | AMS-0 010 C.I. |
| Aparisi, E. | ULT-0 019 C.I. |
| Arana, Guillermo | AFS-1 004 |
| Arana, Miguel | AFS-1 004 |
| Arcos, R. | AEV-0 005 |
| Ardid, M. | ASA-0 015 C.I. |
| Ardid, M. | ULT-0 016 C.I. |
| Arenaz Gombau, Angel | AED-3 002 C.I. |
| Arenaz Gombau, Angel | AED-3 004 C.I. |
| Arnay Sarabia, Héctor | AED-4 005 C.I. |
| Aroeira, Carlos | AAM-5 003 C.I. |
| Arrizabalaga, Haritz | ASA-0 012 C.I. |
| Asensio, César | AAM-4 001 |
| Aspöck, Lukas | AFS-0 002 C.I. |
| Aspuru Soloaga, Itziar | ASL-0 003 C.I. |

| | |
|---|---|
| Astley, R. J. | AFS-0 003 C.I. |
| Atanasio Moraga, Pedro | AAM-0 006 C.I. |
| Atanasio-Moraga, Pedro | AAM-4 011 C.I. |
| Atanasio Moraga, Pedro | AAM-6 001 C.I. |
| Atanasio-Moraga, Pedro | AAM-6 006 |
| Atanasio-Moraga, Pedro | AED-2 010 |
| Atienza Jiménez, Pablo J. | ASL-0 006 C.I. |
| Ausejo Prieto, Miguel | AAM-1 002 C.I. |
| Ausejo Prieto, Miguel | AED-2 016 C.I. |
| Ausejo Prieto, Miguel | AED-3 002 C.I. |
| Ausejo Prieto, Miguel | AED-3 004 C.I. |
| Báez Montenegro, Andrea | AAM-0 010 |
| Bañuls Juan, Xavier | AFS-1 001 |
| Baptista, Luiz Roberto | AAM-4 004 |
| Baptista, Luiz Roberto | AMS-0 006 C.I. |
| Barba, Arturo | ASL-0 017 C.I. |
| Barba, Arturo | ASL-0 018 C.I. |
| Barba, Arturo | ASL-0 026 C.I. |
| Barbosa Prieto, Olga | AAM-6 003 C.I. |
| Barreiro, J. | AED-2 009 C.I. |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-0 006 C.I. |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-2 004 C.I. |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-2 006 |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-4 011 C.I. |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-6 001 C.I. |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AAM-6 006 |
| Barrigón Morillas, Juan Miguel | AED-2 010 |
| Barrios Galán, María del Mar | ASA-0 007 C.I. |
| Barros, Jeanne Denise | AAM-4 004 |
| Barti Domingo, Robert | AAM-0 024 |
| Barti Domingo, Robert | AAM-4 008 |
| Bastián Monarca; Nicolás | AAM-0 009 |
| Bastián Monarca, Nicolás | AAM-0 010 |
| Bastián Monarca, Nicolás | AEV-0 002 |
| Belloch, Jose A. | AFS-0 001 |
| Benedito, J. | ULT-0 009 C.I. |
| Benedito, J. | ULT-0 010 C.I. |
| Bermejo Presa, Nicolás | AED-0 009 C.I. |
| Bermejo Presa, Nicolás | AED-4 007 C.I. |
| Bertó Carbó, Laura | AAM-0 013 |
| Blanco Martín, E. | ASL-0 022 C.I. |
| Blanco, Alfonso | ULT-0 001 C.I. |
| Blasco, X. | ASL-0 014 C.I. |
| Blasco-Yepes, C. | AMS-0 001 C.I. |
| Blasco-Yepes, C. | AMS-0 008 C.I. |
| Blázquez Martín, Juan M. | ASL-0 006 C.I. |

| | |
|---|---|
| Bon, J . | ULT-0 017 C.I. |
| Bon, J. | ULT-0 010 C.I. |
| Bordera, A. | AEV-0 007 |
| Boyra, Guillermo | ASA-0 010 C.I. |
| Boyra, Guillermo | ASA-0 012 C.I. |
| Braga, Margarida | AAM-1 003 C.I. |
| Bravo Arranz, Daniel | AED-3 004 C.I. |
| Bravo, José Mª | ULT-0 015 C.I. |
| Bravo, José María | ULT-0 006 C.I. |
| Brocal Fernández, Francisco | AED-0 007 |
| Bustamante Fernández, María Teresa | ASL-0 003 C.I. |
| Bustamante, P. | ASL-0 025 C.I. |
| Calise, Lucio | ASA-0 011 C.I. |
| Calzado Estepa, Eva | AED-4 003 |
| Calzado Estepa, Eva | ASL-0 007 C.I. |
| Calzado Estepa, Eva | ASL-0 008 C.I. |
| Calzado Estepa, Eva | AED-0 007 |
| Camacho, Jorge | ULT-0 005 C.I. |
| Camarena, F. | AED-2 009 C.I. |
| Campello Vicent, Héctor | AAM-2 003 C.I. |
| Campello Vicent, Héctor | AAM-2 005 |
| Campillo Davó, Nuria | AAM-2 003 C.I. |
| Campillo Davó, Nuria | AAM-2 004 C.I. |
| Campillo Davó, Nuria | AAM-2 005 |
| Campos, Teófilo de | AFS-0 004 C.I. |
| Candelas, P. | ULT-0 019 C.I. |
| Candelas, Pilar | AED-2 002 C.I. |
| Carbajo, J. | AEV-0 006 |
| Carbajo, Jesus | AAM-2 002 |
| Carbajo, Jesús | AED-2 014 |
| Carbajo, Jesús | AEV-0 004 |
| Carbajo, Jesus | ULT-0 008 C.I. |
| Carballeira, J. | AED-2 012 |
| Cárdenas Mansilla, Jorge | AAM-6 002 C.I. |
| Cardona, J. | AEV-0 007 |
| Cardona, J. | AEV-0 005 |
| Carrascal, Teresa | AED-0 006 C.I. |
| Carretero de la Rocha, David | AAM-0 004 C.I. |
| Carretero de la Rocha, David | AAM-0 019 C.I. |
| Carretero de la Rocha, David | AAM-1 004 C.I. |
| Carro Rejas, Carmen | AED-3 003 C.I. |
| Carvalho , Carlos | AAM-3 006 |
| Carvalho, António P. O. | AED-0 003 |
| Carvalho, António P. O. | AED-0 004 |
| Carvalho, Miguel | AMS-0 010 C.I. |
| Casla Herguedas, Belén | AED-1 001 C.I. |

| | |
|---|---|
| Casla, Belén | AED-0 006 C.I. |
| Castillo, Aitor H. | AAM-4 001 |
| Castiñeira-Ibáñez, S. | AED-2 011 C.I. |
| Castiñeira-Ibáñez, S. | AMS-0 008 C.I. |
| Castiñeira-Ibáñez, Sergio | AMS-0 009 |
| Cavalcante Alécio, Camila | AED-1 007 |
| Cebrecos, A. | ULT-0 011 C.I. |
| Cecilia, José María | AFS-1 010 C.I. |
| Cerdà Ferre, Josep | AAM-3 007 |
| Cerdá, Salvador | ASL-0 017 C.I. |
| Cerdá, Salvador | ASL-0 018 C.I. |
| Cerdá, Salvador | ASL-0 026 C.I. |
| Cervera, C. | ULT-0 009 C.I. |
| Chimeno Manguán, Marcos | AFS-2 001 C.I. |
| Chinchurreta, Francisco | ULT-0 012 C.I. |
| Chinchurreta, Francisco | ULT-0 013 C.I. |
| Christ, Roberto | AED-0 008 |
| Cibrián, Rosa María | ASL-0 017 C.I. |
| Cibrián, Rosa María | ASL-0 018 C.I. |
| Cibrián, Rosa María | ASL-0 026 C.I. |
| Cibrian, Rosa María | C.P. 003 |
| Cid Quintero, Juan Ramón | ASA-0 007 C.I. |
| Claro, Teresa | AAM-1 003 C.I. |
| Clemente Medina, María del Carmen | ASA-0 006 C.I. |
| Climent, Miguel A. | ULT-0 008 C.I. |
| Cobos, Maximo | AFS-1 005 C.I. |
| Cobos, Maximo | AFS-1 007 C.I. |
| Colorado Aranguren, David | AAM-0 007 |
| Colorado Aranguren, David | AAM-4006 C.I. |
| Córdoba Selles, Pilar | ASA-0 006 C.I. |
| Crespo Amorós, J. E. | AED-2 001 C.I. |
| Cueto Ancela, José Luis | AAM-0 014 C.I. |
| Cueto Ancela, Jose Luis | AAM-0 022 |
| Cueto Ancela, José Luis | AAM-1 005 |
| Cueto Ancela, José Luis | ASA-0 003 C.I. |
| Daumal i Domènech, Francesc | AAM-0 020 C.I. |
| Daumal i Domènech, Francesc | AAM-3 007 |
| Daumal i Domènech, Francesc | AAM-4 007 C.I. |
| Daumal i Domènech, Francesc | AAM-4 010 C.I. |
| Daumal i Domenèch, Francesc | AAM-6 007 C.I. |
| Daumal i Domènech, Francesc | AED-4 008 C.I. |
| David Denia, Francisco | AED-2 014 |
| De la Cruz Lecanda, Azucena | AAM-1 002 C.I. |
| Debut, Vincent | AAM-5 002 C.I. |
| Debut,Vincent | AMS-0 010 C.I. |
| Delgado, Rosario | ULT-0 004 C.I. |

| | |
|---|---|
| Demaría Casteñeda, Ignacio | AAM-0 007 |
| Demaria Casteñeda, Ignacio | AAM-4006 C.I. |
| Denia, F.D. | AED-2 012 |
| Dias Carrilho, João A. | AAM-0 025 |
| Dias Carrilho, João A. | AAM-2 008 |
| Dias Pereira, Telmo | AEV-0 003 C.I. |
| Díaz Sanchidrian, César | AED-2 008 C.I. |
| Díaz Sanchidrián, César | AED-3 001 C.I. |
| Díaz Sanchidrián, César | ASL-0 005 C.I. |
| Díaz-Chyla, Alexander | ASL-0 005 C.I. |
| Diego, María de | AFS-1 009 C.I. |
| Diego, María de | AFS-1 012 |
| Domingo Bets, Salvador | AED-1 001 C.I. |
| Domingo Bets, Salvador | AED-1 002 C.I. |
| Domingo Bets, Salvador | AED-1 003 C.I. |
| Duarte, Elizabeth de A.C. | AED-1 007 |
| Encina Encina, Lourdes | ASA-0 007 C.I. |
| Espinel Valdivieso, Ana | AED-2 016 C.I. |
| Espinel Valdivieso, Ana | AED-3 004 C.I. |
| Espinel Valdivieso, Ana Esther | AAM-1 002 C.I. |
| Espinel, Ana | AED-3 002 C.I. |
| Espinosa, Víctor | ASA-0 008 C.I. |
| Espinosa, Víctor | ASA-0 009 C.I. |
| Espinosa, Víctor | ASA-0 011 C.I. |
| Esteve Rico, Juan Carlos | AMS-0 003 |
| Esteve Rico, Juan Carlos | AMS-0 004 |
| Esteve Rico, Juan Carlos | ASL-0 007 C.I. |
| Esteve Rico, Juan Carlos | ASL-0 008 C.I. |
| Estreder, Juan | AFS-1 008 C.I. |
| Estreder, Juan | AFS-1 009 C.I. |
| Estruch, Vicent | ASA-0 011 C.I. |
| Estruch, Vicente D. | ASA-0 008 C.I. |
| Expósito Paje, Santiago | AAM-0 015 |
| Expósito Paje, Santiago | AAM-0 016 |
| Expósito Paje, Santiago | AAM-0 017 |
| Ezpeleta Bielsa, Enrique | AAM-0 026 |
| Fazenda, Pedro | AAM-3 006 |
| Fazi, F. M. | AFS-0 003 C.I. |
| Fazi, Filippo Maria | AFS-0 004 C.I. |
| Fazi, Filippo Maria | AFS-0 006 C.I. |
| Felis, I. | ASA-0 015 C.I. |
| Felis, I. | ULT-0 016 C.I. |
| Fernández de las Heras, María José | AFS-2 001 C.I. |
| Fernández Vázquez, Victoriano | AAM-0 015 |
| Fernández Vázquez, Victoriano | AAM-0 016 |
| Fernández Vázquez, Victoriano | AAM-0 017 |

| | |
|---|---|
| Fernández, Marta | AED-2 008 C.I. |
| Fernández, Marta | ASL-0 023 C.I. |
| Ferreira, Andreia | AAM-2 004 C.I. |
| Ferrer, J. | ULT-0 016 C.I. |
| Ferrer, Miguel | AFS-1 008 C.I. |
| Ferrer, Miguel | AFS-1 012 |
| Ferri García, Marcelino | AAM-0 003 |
| Ferri, Marcelino | ULT-0 006 C.I. |
| Ferri, Marcelino | ULT-0 015 C.I. |
| Fradique, Jorge | AAM-5 005 C.I. |
| Freddy, John | AAM-0 021 |
| Frutos Vázquez, Borja | AED-1 001 C.I. |
| Fuenmayor, F.J. | AED-2 012 |
| Fuster Palmer, J. | AMS-0 009 |
| Gabiola Ondarra, Francisco Javier | AAM-0 007 |
| Gabiola Ondarra, Francisco Javier | AAM-4 006 C.I. |
| Galceran, S. | AEV-0 005 |
| Galindo, M. | AED-1 006 C.I. |
| Galindo, M. | ASL-0 016 C.I. |
| Galindo, M. | ASL-0 024 C.I. |
| Galindo, M. | ASL-0 025 C.I. |
| Gallego-Juárez, Juan A. | ULT-0 004 C.I. |
| Gameiro da Silva, Manuel C. | AAM-0 025 |
| Gameiro da Silva, Manuel C. | AAM-2 008 |
| Gándara, Fernando de la | ASA-0 011 C.I. |
| Gao, Chang | ULT-0 006 C.I. |
| Garay Vargas, Elisa | ASL-0 004 C.I. |
| Garay-Vargas, Elisa | AED-4 006 C.I. |
| García González, S. | ASL-0 022 C.I. |
| García Martínez, Silvia G. | ASL-0 004 C.I. |
| García Pérez, Igone | ASL-0 003 C.I. |
| García Terán, José Mª. | AEV-0 001 C.I. |
| García-Martínez, Silvia G. | AED-4 006 C.I. |
| Garcia-Perez, J.V. | ULT-0 009 C.I. |
| Garcia-Perez, J.V. | ULT-0 010 C.I. |
| García-Raffi, L.M. | ULT-0 011 C.I. |
| Garzón, Beatriz | AAM-4 005 |
| Garzón, Beatriz | AAM-6 005 |
| Gey Flores, Ricardo | AAM-0 014 C.I. |
| Gey Flores, Ricardo | AAM-1 005 |
| Gey, Ricardo | AAM-0 022 |
| Gil, Santos Pedro | AED-2 006 |
| Giménez Anaya, Isabel | AAM-0 004 C.I. |
| Giménez Anaya, Isabel | AAM-0 019 C.I. |
| Giménez Anaya, Isabel | AAM-1 004 C.I. |
| Giménez Pérez, Alicia | AAM-3 007 |

| | |
|---|---|
| Giménez Pérez, Alicia | AED-1 006 C.I. |
| Giménez Pérez, Alicia | ASL-0 017 C.I. |
| Giménez Pérez, Alicia | ASL-0 018 C.I. |
| Giménez Pérez, Alicia | ASL-0 026 C.I. |
| Gimenez Pérez, Alicia | C.P. 003 |
| Girón, Sara | AED-1 006 C.I. |
| Girón, Sara | ASL-0 016 C.I. |
| Girón, Sara | ASL-0 017 C.I. |
| Girón, Sara | ASL-0 023 C.I. |
| Girón, Sara | ASL-0 025 C.I. |
| Godinho, L. | AEV-0 006 |
| Godinho, Luis | AAM-2 004 C.I. |
| Godinho, Luís | AED-2 006 |
| Godinho, Luís | AAM-2 002 |
| Gomes, Virgínia C. | AAM-5 006 C.I. |
| Gómez Alfageme, J.J. | ASL-0 022 C.I. |
| Gómez Escobar, Valentín | AAM-0 006 C.I. |
| Gómez Lozano Vicente | ASL-0 002 C.I. |
| Gómez Lozano, Vicente | ASL-0 013 C.I. |
| Gomez, Sonsoles | AED-3 002 C.I. |
| Gonçalves Martins, Helder Miguel | AED-0 013 C.I. |
| Gonzalez Baixauli, Genaro | ASL-0 001 C.I. |
| González de la Peña, Penélope | AED-0 001 C.I. |
| González Vázquez, X.P. | AAM-0 001 C.I. |
| Gonzalez, Alberto | AFS-1 008 C.I. |
| Gonzalez, Alberto | AFS-0 001 |
| Gonzalez-Salido, Nuria | ULT-0 005 C.I. |
| Gortari, Jimena de | AAM-4 003 |
| Gortari, Jimena de | AAM-6 007 C.I. |
| Grillo, Maria Lúcia | AAM-4 004 |
| Grillo, Maria Lúcia | AMS-0 006 C.I. |
| Grilo Bensusan, Álvaro | AAM-0 027 C.I. |
| Guerreiro, André | AAM-4 013 |
| Guillem Cánovas, Andrea | AAM-0 011 |
| Guillém Guillamón, Ignacio | AED-0 011 C.I. |
| Guillén Guillamón Ignacio | ASL-0 002 C.I. |
| Guillen Guillamón, Ignacio | ASL-0 013 C.I. |
| Guinot, Ángel | ULT-0 001 C.I. |
| Guski, Martin | ASL-0 020 C.I. |
| Gutiérrez-Parera, Pablo | AFS-0 005 C.I. |
| Gutierrez-Parera, Pablo | AFS-1 007 C.I. |
| Gutierrez-Parera, Pablo | AFS-1 011 C.I. |
| Hekkenberg, Rob | ULT-0 012 C.I. |
| Hekkenberg, Rob | ULT-0 013 C.I. |
| Hernández Molina, Ricardo | AAM-0 014 C.I. |
| Hernandez Molina, Ricardo | AAM-0 022 |

| | |
|---|---|
| Hernández Molina, Ricardo | AAM-1 005 |
| Hernández Molina, Ricardo | ASA-0 003 C.I. |
| Hernandez, Maria Carmen | ASA-0 012 C.I. |
| Herranz García, Silvia | AAM-0 002 |
| Herranz Pascual, Karmele | ASL-0 003 C.I. |
| Herranz Pedriza, Sara | AAM-1 002 C.I. |
| Herranz, Luis E. | ULT-0 004 C.I. |
| Herrera Martínez, Marcelo | AAM-0 021 |
| Herrera Martínez, Marcelo | AED-2 013 |
| Herrera Martínez, Marcelo | AFS-1 002 |
| Herrera Martínez, Marcelo | AFS-1 003 |
| Herrero, J. M. | ASL-0 014 C.I. |
| Hervás Zafra, Blanca | AED-2 007 C.I. |
| Hilton. Adrian | AFS-0 004 C.I. |
| Hrelja González, Patricia | AED-4 005 C.I. |
| Huérfano, Alvarado | AAM-0 021 |
| Huertas Gallardo, Pedro | AAM-0 015 |
| Huertas Gallardo, Pedro | AAM-0 016 |
| Huertas Gallardo, Pedro | AAM-0 017 |
| Iglesias Marroig, Magdalena | ASA-0 006 C.I. |
| Imbernón, Baldomero | AFS-1 010 C.I. |
| Inácio, Octávio | AAM-5 002 C.I. |
| Inglês, Fátima | AAM-5 005 C.I. |
| Isern, D. | AEV-0 007 |
| Ivorra, Salvador | AAM-2 004 C.I. |
| Ivorra, Salvador | ULT-0 008 C.I. |
| Jiménez, N. | ULT-0 011 C.I. |
| Johansson, Reine | AED-4 004 C.I. |
| Jorge, David | ULT-0 015 C.I. |
| Klipell Filho, Sérgio | AED-0 002 |
| Kohnen, Michael | AFS-0 002 C.I. |
| L.J. Salmerón-Contreras, | ULT-0 011 C.I. |
| Lacambra, J. | AEV-0 007 |
| Lancón Rivera, Laura A. | ASL-0 004 C.I. |
| Lancón-Rivera, Laura A. | AED-4 006 C.I. |
| Lavie, Antoine | ULT-0 003 C.I. |
| Leblanc, Alexandre | ULT-0 003 C.I. |
| León, A.L. | ASL-0 024 C.I. |
| Llopis Reyna, Ana | AED-0 011 C.I. |
| LLopis Reyna Ana | ASL-0 002 C.I. |
| Llopis Reyna, Ana | ASL-0 013 C.I. |
| Llorens, C. D. | ASA-0 015 C.I. |
| Llorens, Susana | ASA-0 009 C.I. |
| López Santos, Fernando | AAM-0 004 C.I. |
| López Santos, Fernando | AAM-0 019 C.I. |
| López Santos, Fernando | AAM-1 004 C.I. |

| | |
|---|---|
| López Uribarri, L. | AAM-0 001 C.I. |
| López, José J. | AFS-0 005 C.I. |
| Lopez, Jose Javier | AFS-1 011 C.I. |
| López, Juan Manuel | AAM-4 001 |
| Lopez-Ballester, Jesús | AFS-1 005 C.I. |
| Lopez-Ballester, Jesus | AFS-1 007 C.I. |
| López-Mesa, Belinda | AED-4 008 C.I. |
| Luceño Ramos, Maria Luisa | AAM-3 007 |
| Luceño Ramos, Maria Luisa | ASL-0 010 C.I. |
| Lupoiu, Mihaita | AFS-0 001 |
| Machimbarrena, María | AED-4 004 C.I. |
| Machín, Jorge | AFS-1 004 |
| Maderuelo-Sanz, Rubén | AAM-4 011 C.I. |
| Madrid Descalzo, Lorena de la | ULT-0 006 C.I. |
| Magdaleno, Jesús | AEV-0 001 C.I. |
| Magdaleno, Jesús | AEV-0 009 |
| Magrans, F. X. | ASL-0 011 C.I. |
| Malecki, Pawel | P.I. 001 |
| Marey Pérez, M.F. | AAM-0 001 C.I. |
| Marí Ribas, Albert | AED-0 007 |
| Marisol Yebra Calleja, | AED-0 007 |
| Martí, Josep | ASL-0 012 C.I. |
| Martín Bravo, Mª Ángeles | AAM-0 011 |
| Martín Bravo, Mª Ángeles | AEV-0 001 C.I. |
| Martín Bravo, Mª Ángeles | AEV-0 009 |
| Martín Fanjul, Valentín | AAM-0 020 C.I. |
| Martín Fanjul, Valentín | AAM-4 007 C.I. |
| Martínez Aragón, J. F. | ASA-0 003 C.I. |
| Martínez, Ignacio | ULT-0 001 C.I. |
| Martínez, Ignacio | ULT-0 004 C.I. |
| Martínez, José | AEV-0 004 |
| Martinez-Escriva, G. | ULT-0 009 C.I. |
| Martinez-Escriva, G. | ULT-0 010 C.I. |
| Martínez-Mora, J. A. | ASA-0 015 C.I. |
| Martínez-Mora, J.A. | ULT-0 016 C.I. |
| Martin-Morato, Irene | AFS-1 007 C.I. |
| Mateus, Carolina R. G. | AED-0 004 |
| Mateus, Diogo | AED-2 006 |
| Mateus, Diogo | AED-4 002 |
| Mateus, Diogo | AEV-0 003 C.I. |
| Mateus, Marco Antunes | AED-0 013 C.I. |
| Mateus, Mário | AAM-0 025 |
| Mateus, Mário | AAM-2 008 |
| Matos, João António de | AAM-5 004 |
| Medina-Bonilla, Diego | AAM-4 011 C.I. |
| Medina-Montoya Hellgren, Luis | AAM-0 019 C.I. |

| | |
|---|---|
| Medina-Montoya, Luis | AAM-4 001 |
| Melgarejo, J. C. | ULT-0 019 C.I. |
| Mendes, Paulo A. | AAM-2 004 C.I. |
| Méndez Sierra, Juan A. | AAM-0 006 C.I. |
| Méndez-Sierra, Juan A. | AAM-4 011 C.I. |
| Méndez-Sierra, Juan A. | AAM-6 006 |
| Méndez-Sierra, Juan A. | AED-2 010 |
| Menzies, Dylan | AFS-0 004 C.I. |
| Menzies, Dylan | AFS-0 006 C.I. |
| Miquel Batle, Joan | ASA-0 006 C.I. |
| Montes González, David | AAM-0 006 C.I. |
| Montes-González, David | AAM-6 001.C.I. |
| Montes-González, David | AAM-6 006 |
| Montes-González, David | AED-2 010 |
| Monzón, Marta | AED-4 008 C.I. |
| Mora, M.E. | ULT-0 009 C.I. |
| Moreno Balboa, María de la O. | AAM-0 007 |
| Moreno, Gabriel | AFS-1 007 C.I. |
| Moreno, Gabriel | AFS-1 005 C.I. |
| Moreno, Gala | ASA-0 010 C.I. |
| Murillo, D. M. | AFS-0 003 C.I. |
| Nadal Gisbert, A. V. | AED-2 001 C.I. |
| Nadal-Gisbert, Antonio Vicente | AED-2 014 |
| Nava Baro, Enrique | ASA-0 006 C.I. |
| Navacerrada Saturio, María de los Ángeles | AED-2 008 C.I. |
| Navacerrada Saturio, María de los Ángeles | AED-3 001 C.I. |
| Navacerrada Saturio, María de los Ángeles | ASL-0 005 C.I. |
| Navalón Sala, I. | AMS-0 001 C.I. |
| Navalón Sala, I. | AMS-0 008 C.I. |
| Navarro Ruiz, Juan Miguel | AAM-0 026 |
| Navarro Ruiz, Juan Miguel | AAM-3 001 C.I. |
| Navarro Ruiz, Juan Miguel | AFS-1 010 C.I. |
| Navarro-Cabo, A. | ULT-0 010 C.I. |
| Negrete, Jorge | AAM-4 005 |
| Nencini, Luca | AAM-3 002 C.I. |
| Nencini, Luca | AAM-0 028 |
| Noriega Linares, Juan Emilio | AAM-3 001 C.I. |
| Notario Tévar, Antonio | AAM-0 023 C.I. |
| Notario Tevar, Antonio | AAM-1 001 C.I. |
| Notario Tévar, Antonio | AED-0 010 C.I. |
| Nunes, Maria Fernanda de O. | AED-0 002 |
| Nunes, Maria Fernanda de O. | AED-0 008 |
| Olaya Adán, Manuel | AED-1 001 C.I. |
| Oliveira Nunes, Maria Fernanda de | ASL-0 009 C.I. |
| Oliveira, Tiago | AAM-3 006 |
| Ordóñez, Patricia | ASA-0 008 C.I. |

| | |
|---|---|
| Ordóñez, Patricia | ASA-0 009 C.I. |
| Ordoñez, Patricia | ASA-0 011 C.I. |
| Orduna Martín, Carlos | ASA-0 007 C.I. |
| Orellana, Marcia | AAM-6 005 |
| Pacheco, Fernanda | AED-0 008 |
| Paterlini, Leonardo | AAM-4 005 |
| Paterlini, Leonardo | AAM-6 005 |
| Patraquim, Ricardo | AED-2 006 |
| Patricio, Jorge | C.P. 001 |
| Pavón García, Ignacio | AED-1 001 C.I. |
| Pavón, Ignacio | AED-1 002 C.I. |
| Paz Núñez, Francisco | AAM-0 015 |
| Paz Núñez, Francisco | AAM-0 016 |
| Paz Núñez, Francisco | AAM-0 017 |
| Pedersoli, Stefano | AED-4 004 C.I. |
| Pedrero González, Antonio | AED-2 008 C.I. |
| Pedrero González, Antonio | AED-3 001 C.I. |
| Pedrero González, Antonio | ASL-0 005 C.I. |
| Pedrero González, Antonio | ASL-0 023 C.I. |
| Peinado Hernández, Fernando | AED-0 009 C.I. |
| Peinado Hernández, Fernando | AED-4 007 C.I. |
| Pelzer, Sönke | AFS-0 002 C.I. |
| Peral-Orts, Ramon | AAM-2 002 |
| Peral Orts, Ramón | AAM-2 003 C.I. |
| Peral Orts, Ramón | AAM-2 004 C.I. |
| Peral Orts, Ramón | AAM-2 005 |
| Peral Orts, Ramón | AAM-2 006 |
| Pereira, Cláudia F. R. T. | AED-0 003 |
| Pereira, R. J. F. | AED-4 009 |
| Perera, Sofía | AAM-6 005 |
| Pérez Gimeno, N. | ASA-0 003 C.I. |
| Pérez Troya, Iluminada | AED-2 007 C.I. |
| Pérez, Isabel | ASA-0 011 C.I. |
| Pérez-Arjona, Isabel | ASA-0 008 C.I. |
| Pérez-Arjona, Isabel | ASA-0 009 C.I. |
| Perez-Solano, Juan J. | AFS-1 005 C.I. |
| Petrovici, Alina | AAM-0 022 |
| Picó, R. | ULT-0 011 C.I. |
| Pinto, Alberto | ULT-0 001 C.I. |
| Pinto, Alberto | ULT-0 004 C.I. |
| Pinto, Alberto | ULT-0 017 C.I. |
| Piñero, Gema | AFS-1 009 C.I. |
| Piñero, Gema | AFS-1 012 |
| Planells, Ana | ASL-0 017 C.I. |
| Planells, Ana | ASL-0 018 C.I. |
| Planells, Ana | ASL-0 026 C.I. |

| | |
|---|---|
| Ponce Patrón, Dulce R. | ASL-0 004 C.I. |
| Ponce, Florencia | AAM-6 005 |
| Ponce-Patrón, Dulce R. | AED-4 006 C.I. |
| Portilla, I. | ULT-0 010 C.I. |
| Poveda Martínez, Pedro | AAM-2 004 C.I. |
| Poveda Martínez, Pedro | AAM-2 005 |
| Poveda Martínez, Pedro | AAM-2 006 |
| Poveda Martínez, Pedro | AMS-0 005 |
| Preto Paulo, Joel | AAM-3 006 |
| Priego, Javier | AAM-0 022 |
| Prieto-Gajardo, Carlos | AAM-0 006 C.I. |
| Prieto-Gajardo, Carlos | AAM-6 001.C.I. |
| Prieto-Gajardo, Carlos | AAM-6 006 |
| Prieto-Gajardo, Carlos | AED-2 010 |
| Puginelli Brandão, Luiz | AMS-0 006 C.I. |
| Puig, Vicente | ASA-0 008 C.I. |
| Puig, Vicente | ASA-0 009 C.I. |
| Puig, Vicente | ASA-0 011 C.I. |
| Quintana Gallardo, Alberto | AED-2 007 C.I. |
| Quintana-Ortí, Enrique S. | AFS-0 001 |
| Ramis Soriano, Jaime | AAM-0 013 |
| Ramis Soriano, Jaime | AAM-2 002 |
| Ramis Soriano, Jaime | AAM-2 004 C.I. |
| Ramis Soriano, Jaime | AAM-2 005 |
| Ramis Soriano, Jaime | AAM-2 006 |
| Ramis Soriano, Jaime | AED-2 014 |
| Ramis Soriano, Jaime | AEV-0 004 |
| Ramis Soriano, Jaime | AEV-0 006 |
| Ramis Soriano, Jaime | AEV-0 009 |
| Ramis Soriano, Jaime | AMS-0 005 |
| Ramos Galino, Fernando | AAM-4 010 C.I. |
| Ramos Peinado, Germán. | AFS-1 001 |
| Ramos Peinado, Germán. | AFS-1 006 C.I. |
| Redondo Pastor, Francisco Javier | AED-2 007 C.I. |
| Redondo Pastor, Francisco Javier | AFS-1 006 C.I. |
| Redondo, J. | ASL-0 014 C.I. |
| Redondo, J. | ULT-0 011 C.I. |
| Reschke Pires, Josiane | AED-0 002 |
| Reschke Pires, Josiane | ASL-0 009 C.I. |
| Retamero Coro, Myriam | ASA-0 007 C.I. |
| Rey Tormos, Romina del | AAM-0 013 |
| Rey Tormos, Romina del | AED-0 011 C.I. |
| Rey Tormos, Romina del | AED-2 002 C.I. |
| Rey Tormos, Romina del | AMS-0 002 C.I. |
| Reyes, María Fernanda | AED-2 013 |
| Rey-Gozalo, Guillermo | AAM-0 006 C.I. |

| | |
|---|---|
| Rey-Gozalo, Guillermo | AAM-4 011 C.I. |
| Rey-Gozalo, Guillermo | AAM-6 001 C.I. |
| Rey-Gozalo, Guillermo | AAM-6 006 |
| Rey-Gozalo, Guillermo | AED-2 010 |
| Riera, Enrique | ULT-0 001 C.I. |
| Riera, Enrique | ULT-0 004 C.I. |
| Riera, Enrique | ULT-0 017 C.I. |
| Riesco García, Jose Ignacio | AAM-1 002 C.I. |
| Rodero Antunez, Carlos | AED-0 005 C.I. |
| Rodrigo Saura, Francisco Javier | ASA-0 004 C.I. |
| Rodrigues A. Monteiro, Carolina | AED-4 004 C.I. |
| Rodrigues, Carlos César | AAM-4 013 |
| Rodrigues, Carlos César | AAM-5 004 |
| Rodrigues, Carlos César | AAM-5 006 C.I. |
| Rodrigues, Carlos César | AED-0 013 C.I. |
| Rodrigues, Carlos César | AED-4 009 |
| Rodrigues, Marina I. N. | AED-0 004 |
| Rodríguez Fernández, Cástor | AED-1 005 C.I. |
| Rodríguez Manzo, Fausto | AAM-3 007 |
| Rodríguez Manzo, Fausto E. | ASL-0 004 C.I. |
| Rodriguez Pérez, Mari Paz | AAM-1 002 C.I. |
| Rodríguez Ruiz, Amadora | ASA-0 007 C.I. |
| Rodríguez Sánchez, Victoria | ASA-0 007 C.I. |
| Rodriguez, I. | ULT-0 019 C.I. |
| Rodríguez, Josep | AFS-1 012 |
| Rodríguez-Manzo, Fausto | AED-4 006 C.I. |
| Roibás Millán, Elena | AFS-2 001 C.I. |
| Romero Fernández, Amelia | AED-0 006 C.I. |
| Romero Fernández, Amelia | AED-1 001 C.I. |
| Romero, Juan Pedro | AMS-0 002 C.I. |
| Romero-García, V. | ULT-0 011 C.I. |
| Romeu, J. | AEV-0 005 |
| Romo, William | AFS-1 002 |
| Romo, William | AFS-1 003 |
| Rosa, Pedro Alexandre | AAM-5 004 |
| Rosão, Vitor | AAM-4 009 |
| Rossell, Ivana | ASL-0 012 C.I. |
| Rubio Benito, Alberto | AED-0 009 C.I. |
| Rubio, Constanza | AED-2 011 C.I. |
| Rubio, Constanza | AMS-0 008 C.I. |
| Rubio, Constanza | AMS-0 009 |
| Rubio, Constanza | ULT-0 015 C.I. |
| Rubio, Constanza | ULT-0 019 C.I. |
| Rubio-García, Álvaro O. | AED-2 010 |
| Rufino, Miguel | AAM-6 005 |
| Ruiz, Antonio J. | AAM-4 001 |

| | |
|---|---|
| Saaens de Inestrillas, Alvaro | AFS-1 006 C.I. |
| Sáenz de Inestrillas, A. | AED-2 009 C.I. |
| Sala Milvaques, M.T. | AMS-0 001 C.I. |
| Sala Milvaques, M.T. | AMS-0 008 C.I. |
| Saldaña, M. | ASA-0 015 C.I. |
| Sales Márquez, Diego | AAM-0 014 C.I. |
| Sales Márquez, Diego | AAM-1 005 |
| Sales, Diego | AAM-0 022 |
| Sales, Diego (Jr) | AAM-0 022 |
| San Martín, Ricardo | AFS-1 004 |
| San Millán-Castillo, Roberto | AED-1 001 C.I. |
| San Millán-Castillo, Roberto | AED-1 002 C.I. |
| Sáncehz Rivera, José Luis | ASL-0 015 C.I. |
| Sánchez Bote, J.L. | ASL-0 022 C.I. |
| Sánchez Bote, José Luis | AED-3 001 C.I. |
| Sánchez García, Antonio | ASA-0 004 C.I. |
| Sánchez Gozalo, Gema | AAM-1 002 C.I. |
| Sánchez Perez, Juan Vicente | AAM-0 003 |
| Sánchez Pérez, Juan Vicente | AED-2 007 C.I. |
| Sánchez, Miguel | AAM-2 004 C.I. |
| Sánchez-Milan, Alba | AAM-2 002 |
| Sánchez-Morcillo, V.J. | ULT-0 011 C.I. |
| Sánchez-Orgaz, E.M. | AED-2 012 |
| Sánchez-Pérez, Juan Vicente | AED-2 011 C.I. |
| Sánchez-Pérez, Juan Vicente | AMS-0 008 C.I. |
| Sánchez-Pérez, Juan Vicente | AMS-0 009 |
| Sánchez-Pérez, Juan Vicente | ASL-0 014 C.I. |
| Sánchez-Pérez, Juan Vicente | ULT-0 006 C.I. |
| Sanchis Mullor, Francisco | ASL-0 002 C.I. |
| Sancho Gil, Juan | AED-4 005 C.I. |
| Santander Pantioso, Alvaro | ASL-0 003 C.I. |
| Santos, P. G. | AEV-0 006 |
| Sanz Mata, Ismael | AED-2 016 C.I. |
| Segovia, Enrique | AEV-0 009 |
| Segovia, Enrique G. | AEV-0 004 |
| Segura Alcaraz, J. | AED-2 001 C.I. |
| Segura, Jaume | AFS-1 007 C.I. |
| Segura, Jaume | ASL-0 017 C.I. |
| Segura, Jaume | ASL-0 018 C.I. |
| Segura, Jaume | ASL-0 026 C.I. |
| Segura, Jaume | AFS-1 005 C.I. |
| Sendra, J.J. | AED-1 006 C.I. |
| Serrano Rodrigo, Pau | ASL-0 013 C.I. |
| Sevillano, Xavier | AAM-3 002 C.I. |
| Sierra-Limpo, Mª del Carmen | AAM-6 006 |
| Simón Gálvez, Marcos Felipe | AFS-0 004 C.I. |

| | |
|---|---|
| Simón Hidalgo, Francisco | AFS-2 001 C.I. |
| Simón Hidalgo, Francisco | AED-4 001 C.I. |
| Smith, Sean | AED-4 004 C.I. |
| Sobradillo Benguria,Beatriz | ASA-0 013 C.I. |
| Socoró Carrié, Joan Claudi | AAM-0 028 |
| Socoró Carrié, Joan Claudi | AAM-3 002 C.I. |
| Soldati, Elisa | AAM-4 005 |
| Soldati, Elisa | AAM-6 005 |
| Soler Legname, Virginia | AAM-4 005 |
| Soliveres, Ester | ASA-0 009 C.I. |
| Soliveres, Ester | ASA-0 008 C.I. |
| Soliveres, Ester | ASA-0 011 C.I. |
| Somolinos Orejón, Adolfo | AED-0 009 C.I. |
| Sontacchi, Alois | C.P. 002 |
| Staliunas, K. | ULT-0 011 C.I. |
| Suárez Silva; Enrique | AAM-0 009 |
| Suárez Silva, Enrique | AAM-0 010 |
| Suárez Silva, Enrique | AAM-6 002 C.I. |
| Suárez Silva, Enrique | AAM-6 003 C.I. |
| Suárez, R. | AED-1 006 C.I. |
| Subirà, A. | AEV-0 007 |
| Taborga Pérez, Manuel | AED-1 003 C.I. |
| Tarrero Fernández, Ana Isabel | AAM-0 011 |
| Tarrero, Ana Isabel | AEV-0 001 C.I. |
| Tejedor Sastre, María Teresa | ULT-0 003 C.I. |
| Terán Sierra, Fernando J. | AAM-0 015 |
| Terán Sierra, Fernando J. | AAM-0 016 |
| Terán Sierra, Fernando J. | AAM-0 017 |
| Torres Sánchez, Patricia | AAM-4 010 C.I. |
| Torres, Ana M. | AFS-1 007 C.I. |
| Torres, R. | AEV-0 007 |
| Trujillo Carmona, J. | AAM-0 006 C.I. |
| Uranga, Jon | ASA-0 012 C.I. |
| Uris, Antonio | AED-2 002 C.I. |
| Uris, Antonio | ULT-0 019 C.I. |
| Vallejo Ortega, Gustavo | ASL-0 015 C.I. |
| Vanhille, Christian | ULT-0 003 C.I. |
| Vanstraelen, Michael | AEV-0 008 |
| Vega Catalán, Luis | AED-0 006 C.I. |
| Velasco Fernández, Ana Isabel | AAM-0 007 |
| Velasco Sánchez, Emilio | AAM-2 003 C.I. |
| Venegas-Jiménez, Carmen | AAM-4 011 C.I. |
| Vera Guarinos, Jenaro | AED-0 007 |
| Vera Guarinos, Jenaro | AED-4 003 |
| Vera Guarinos, Jenaro | AMS-0 003 |
| Vera Guarinos, Jenaro | AMS-0 004 |

| | |
|---|---|
| Vera Guarinos, Jenaro | ASL-0 007 C.I. |
| Vera Guarinos, Jenaro | ASL-0 008 C.I. |
| Vicente Esquerdo, Tomás | AED-2 014 |
| Viciano Pastor, Ana | AAM-3 003 |
| Viçoso Patrício, Jorge | ASL-0 009 C.I. |
| Vidal, Antonio M. | AFS-0 001 |
| Vílchez-Gómez, Rosendo | AAM-0 006 C.I. |
| Vílchez-Gómez, Rosendo | AAM-4 011 C.I. |
| Vílchez-Gómez, Rosendo | AAM-6 006 |
| Vílchez-Gómez, Rosendo | AED-2 010 |
| Viñez, Fran | ASL-0 003 C.I. |
| Voländer, Michael | ASL-0 014 C.I. |
| Voländer, Michael | ASL-0 020 C.I. |
| Wang, Nanli | ULT-0 006 C.I. |
| Wiciak, Jerzy | P.I. 001 |
| Yebra Calleja, Marisol | AED-4 003 |
| Yebra Calleja, Marisol | ASL-0 007 C.I. |
| Yebra Calleja, Marisol | ASL-0 008 C.I. |
| Zamarreño, Teófilo | ASL-0 016 C.I. |
| Zamarreño, Teófilo | ASL-0 017 C.I. |
| Zamarreño, Teófilo | ASL-0 023 C.I. |
| Zamarreño, Teófilo | ASL-0 025 C.I. |
| Zamorano Cantó, M. | AED-2 001 C.I. |




**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
**Serrano 144**
**28006 Madrid**
**E-mail: secretaria@sea-acustica.es**
**WEB: www.sea-acustica.es**