XIII Congresso Ibérico de Acústica
55º Congreso Español de Acústica
TECNIACÚSTICA 2024
Faro, 11 a 13 setembro 2024

IT'S A MATCH! TUTORIAL PRÁCTICO PARA LA CREACIÓN DE CAPAS DE ADAPTACIÓN PARA TRANSDUCTORES TERAPÉUTICOS

Juan José Rodríguez-García [1]*, Josep Rodriguez-Sendra [1], José L. Alonso-Ramos [1], Noé Jiménez[1], Alejandro Cebrecos [1], Francisco Camarena [1]

[1] Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular, Universitat Politècnica de València – Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Camino de Vera S/N, 46022 València, Spain
*e-mail: juarodg9@i3m.upv.es

Resumen
Las capas de adaptación de impedancia acústica son un elemento clave en el diseño de transductores de ultrasonidos eficientes, puesto que facilitan que la energía generada durante la mecano-transducción se transmita hacia el exterior del actuador. En general, los materiales activos presentan una impedancia acústica mucho mayor que el medio exterior, como las cerámicas piezoeléctricas empleadas en aplicaciones biomédicas de los ultrasonidos. Para proporcionar una transmisión eficiente de la energía y mejorar el rendimiento electroacústico del sistema, comúnmente se emplean capas de adaptación de impedancia, como por ejemplo las capas de cuarto de longitud de onda. Sin embargo, pese a que los fundamentos son bien conocidos, la literatura es vaga en cuanto a los aspectos prácticos de su fabricación y diseño. En el presente trabajo explicamos de manera detallada un método para el diseño y fabricación de estas capas para emisores de ultrasonidos de potencia, prestando especial atención a las distintas resinas y dopados utilizados, así como en su caracterización, para finalmente obtener el deseado "match".

Palabras clave: capa de adaptación de impedancia, transductores de ultrasonidos, ultrasonidos terapéuticos, capa de adaptación.

Abstract
Acoustic impedance matching layers are a key element in the design of efficient ultrasonic transducers, since they facilitate the energy generated during mechanotransduction to be transmitted to the outside of the actuator. In general, active materials have a much higher acoustic impedance than the external medium, as in the case of piezoelectric ceramics used in biomedical ultrasound applications. To provide efficient energy transmission and improve the electroacoustic performance of the system, impedance matching layers, such as quarter-wavelength layers, are commonly employed. However, even though the fundamentals are well known, the literature is vague on the practical aspects of their design and fabrication. In this work we explain in detail a method for the design and fabrication of these layers for power ultrasonic emitters, paying special attention to the different resins and dopings used, as well as on their characterization, to obtain the desired match.

Keywords: impedance matching layer, ultrasound transducers, therapeutic ultrasound, matching layer.

PACS nº. 43.35

1 Introducción

Los transductores de ultrasonidos son una herramienta muy potente tanto a nivel industrial, test no destructivo, como a nivel médico, ya sean aplicaciones de imagen o terapia. La base de estas herramientas consiste en la transmisión de energía ultrasónica a través de un medio, así como su recepción. Al aplicar un campo eléctrico variable a un material piezoeléctrico, este se deforma o se expande en función de la dirección del campo. Cuando el campo eléctrico oscila, el material vibra a la mima frecuencia, y por tanto genera ondas acústicas que se transmiten a través del medio adyacente [1]. Sin embargo, la energía transmitida depende de la diferencia de impedancia acústica entre el piezoeléctrico y el material adyacente. Generalmente, los materiales piezoeléctricos más eficientes, como por ejemplo las cerámicas, son rígidas y densas, lo que resulta en un contraste elevado con materiales similares al agua como los tejidos biológicos, y en esta situación una gran parte de la energía se refleja dentro del propio elemento piezoeléctrico, resultando en una transmisión poco eficiente y un ancho de banda útil muy estrecho [2].

Para facilitar la transmisión de energía se pueden emplear, entre otras técnicas, capas de adaptación de impedancia. Estas capas, normalmente fabricadas a base de resinas dopadas de otros materiales para aumentar su impedancia, deben cumplir una serie de cualidades que mejoran la eficiencia en la transmisión de la energía. La primera consiste en que, en el caso de una única capa, su grosor sea igual a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia a la que se emite, pues en estas condiciones las ondas internas interfieren constructivamente en la dirección de salida del material, y destructivamente en la opuesta. Otra cualidad consiste en utilizar un material con una impedancia acústica concreta, y puesto que es difícil encontrar materiales con valores concretos de impedancia, comúnmente se emplean estrategias de dopado para ajustar los valores de densidad y velocidad de propagación, por ejemplo, empleando resinas epoxi dopadas de tungsteno para aumentar su densidad [3]. Existe mucha literatura sobre los fundamentos teóricos, pero escasean a la hora de detallar un proceso de creación y diseño funcional. En el presente documento se detalla, paso a paso, un método para el diseño y fabricación de estas capas de adaptación y su caracterización para transductores de ultrasonidos de alta intensidad y aplicaciones biomédicas.

2 Base teórica para la realización de una capa de adaptación

Para la realización de una capa de adaptación hay que tener claros los siguientes conceptos que nos ayudaran a elegir el material y las dimensiones adecuadas de este. El tipo de elemento activo que se va a utilizar, las características de este, impedancia acústica. El tipo de medio al que van a ser radiadas las ondas acústicas y las características de este medio de propagación. A partir de estos conocimientos podemos empezar a diseñar la capa de adaptación siguiendo los modelos de transmisión.

2.1 Modelo de transmisión de una onda acústica entre medios con capa de adaptación

Es importante conocer cómo se comporta una onda acústica al cambiar de medio, así como qué ocurre al añadir esta capa intermedia [3] [4]. A partir de las condiciones de continuidad de presión y velocidad entre las ondas incidentes, transmitidas y reflejadas, es posible calcular el coeficiente de transmisión de intensidad acústica.

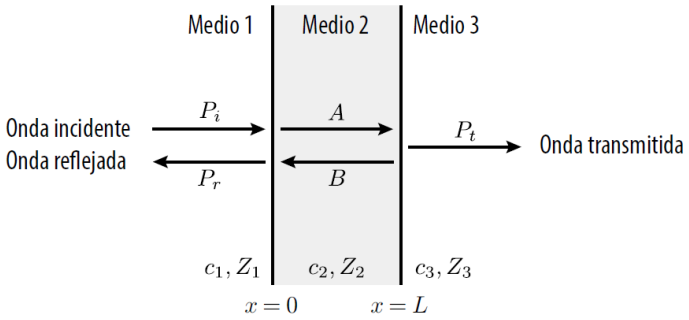


Figura 1 – Transmisión de una onda a través de varios medios.

Cuando situamos una capa de material sitiada entre dos medios diferentes, como en el caso de una capa de adaptación que separa un material piezoeléctrico y otro medio, el coeficiente de transmisión de energía viene dado por

$$T = \frac{4}{2+\left(\frac{Z_3}{Z_1}+\frac{Z_1}{Z_3}\right)(k_2 L)+\left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3}+\frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2}\right)(k_2 L)}, \quad (1)$$

dónde Z_1 es la impedancia del material piezoeléctrico, Z_3 es la impedancia del medio a emitir; Z_2, k_2 y L son la impedancia, número de onda y longitud de la capa de adaptación. La impedancia acústica característica de los materiales viene dada $Z = \rho c$, dónde ρ es la densidad del material. Cuando $Z_1 > Z_2 > Z_3$, el coeficiente de transmisión es máximo cuando la impedancia acústica de la capa y su espesor cumplen las siguientes condiciones:

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}, \quad (2)$$

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}, \quad (3)$$

siendo λ la longitud de onda, c la velocidad de propagación en la capa y f la frecuencia de excitación. A partir de este modelo podemos realizar el diseño de una capa de adaptación para maximizar la transmisión acústica.

Partiendo de las características óptimas de impedancia acústica del material de la capa de adaptación, es necesario buscar un material físico que se adecúe a este valor. La búsqueda de materiales para la capa de adaptación puede realizarse a través de bases de datos o a través de medidas de velocidad y densidad de los materiales de interés. Pero en muchas ocasiones no es posible encontrar un material que presente una impedancia con un valor igual al óptimo. Por este motivo, para cumplir la condición dada por la Ec. (2), se utilizan dopantes para ajustar las propiedades físicas del material.

Por otro lado, generalmente la frecuencia de excitación viene determinada por la aplicación, por lo que, una vez seleccionado el material, la condición de espesor, Ec. (3), se cumple diseñando la capa de adaptación con un grosor específico.

2.2 Estimación de la impedancia acústica en función de materiales dopantes

Para conocer la cantidad óptima de material utilizado en la elaboración de la capa basada en una resina y un material dopante podemos aplicar el modelo de Devaney&Levine (D&L) [5-6]. Este modelo caracteriza la impedancia de una matriz elástica (resina) contaminada con una distribución aleatoria de esferas elásticas (dopante), considerando expresiones efectivas para el módulo de compresibilidad y el módulo de cizalla de los materiales. El modelo se basa en la teoría de dispersión múltiple [10] para

encontrar los parámetros efectivos del medio elástico bifásico. Para una distribuciones aleatorias de inclusiones más pequeñas que la longitud de onda, considerando dispersión múltiple, obtenemos en el material efectivo las relaciones de dispersión para los modos longitudinales y transversales dadas por

$$\left(K_0 + \frac{4}{3}\mu_0\right)k_c^2 - \omega\rho_0 - 4\pi m\rho_e\left(\frac{\omega^2}{k_c^2}\right)A(k_c) = 0,$$

$$\mu_0 k_s^2 - \omega^2\rho_0 - 4\pi m\rho_e\left(\frac{\omega^2}{k_s^2}\right)B(k_s) = 0, \tag{4}$$

donde k_c y k_s son los números de onda longitudinales y transversales en el medio efectivo, K_0, μ_0 y ρ_0 son el módulo de compresibilidad, módulo de cizalla y densidad de la matriz, respectivamente, (resina), $\omega = 2\pi f$, m el valor medio del número de inclusiones por unidad de volumen, y $A(k_c)$ y $B(k_s)$ son las amplitudes de las ondas longitudinales y transversales dispersadas por un único dispersor. Asumiendo que los dispersores son pequeños, aproximación de Rayleigh, podemos obtener los parámetros efectivos de forma implícita [5]

$$K^e = K_0 + C\frac{(3K^e+4\mu^e)\delta K}{3K^e+4\mu^e+3\delta K}, \tag{5}$$

$$\mu^e = \mu_0 + C\frac{5(3K^e+4\mu^e)\mu^e\delta\mu}{(15K^e+20\mu^e)\mu^e+6(K^e+2\mu^e)\delta\mu}, \tag{6}$$

$$\rho^e = \rho_0 + C\delta\rho, \tag{7}$$

donde K^e μ^e y ρ^e son el módulo de compresibilidad, módulo de cizalla y densidad del medio efectivo, $\delta K = K' - K_0, \delta\mu = \mu' - \mu_0$ y $\delta\rho = \rho' - \rho_0, K', \mu'$ y ρ' módulo de compresibilidad, módulo de cizalla y densidad de las inclusiones, y C la concentración en volumen de las inclusiones. En el límite de dispersión débil, es decir, cuando los valores de elasticidad del material final son similares al de la matriz, estas expresiones se simplifican al modelo Kuster-Toksöz (K&T) dado por

$$K^e = K_0 + C\frac{(3K^e+4\mu_0\delta K)}{3(K_0-\delta K)+4\mu^e+3\delta K}, \tag{6}$$

$$\mu^e = \mu_0 + C\frac{6\mu^e(K_0+2\mu_0)\delta\mu}{6(\mu_0-\delta\mu)(K_0+2\mu_0)+\mu_0(9K_0+8\mu_0)}, \tag{7}$$

$$\rho^e = \rho_0 + C\delta\rho, \tag{8}$$

que es válido en la aproximación de dispersión simple.

El total de la concentración de dopante en la resina se caracteriza a partir de la formulación de una disolución, donde se estima, en volumen, la proporción o cantidad de soluto. Para este caso, el soluto serán las inclusiones y la resina el disolvente:

$$C = \frac{M'/\rho\prime}{(M'/\rho\prime+M_0/\rho_0)}, \tag{9}$$

donde M' y M_0 son la masa de las inclusiones y la resina, respectivamente. Por tanto, podemos obtener una aproximación de los módulos elásticos y densidad del medio efectivo en función de un porcentaje de dopado. Después, los valores de velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales en el medio efectivo vienen dadas por:

$$c_L = \sqrt{\frac{K^e+\frac{4}{3}\mu^e}{\rho^e}}, \tag{10}$$

$$c_S = \sqrt{\frac{\mu^e}{\rho^e}}, \tag{11}$$

y la impedancia acústica característica para las ondas longitudinales y transversales es

$$Z_L = c_L \rho^e, \tag{12}$$

$$Z_S = c_S \rho^e, \tag{13}$$

respectivamente.

2.3 Caracterización experimental

Las propiedades acústicas se han caracterizado experimentalmente en diferentes materiales empleando resinas dopadas empleando moldes de silicona de una geometría conocida. Se han empleado técnicas de eco-impulso para estimar la velocidad de propagación de los modos longitudinales. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales en el material compuesto viene dada por

$$c_L = 2L/T, \tag{14}$$

donde T es el tiempo de vuelo medido en reflexión, y L el espesor de la muestra. Por otro lado, la densidad efectiva se puede estimar midiendo el volumen de la pieza y su masa.

3 Validación del diseño

Se ha realizado un estudio de varias resinas y materiales dopantes para verificar el modelo. Las resinas utilizadas han sido (a) Epo-Tek 301, (b) Royapox 5050 CD, y (c) Weicon MS 1000. Como dopantes se ha utilizado (a) Alumina (Al_2O_3), (b) Tungsteno y (c) Óxido de Cerio (CeO_2).

Empleando el modelo D&L, y cogiendo como ejemplo la resina Epo-Tek 301 y tungsteno como dopante, podemos estimar las propiedades mecánicas en función del porcentaje de material dopante. La Fig. 2 muestra un ejemplo para la resina Epo-Tek 301 y tungsteno, donde se muestran las estimaciones del modelo D&L y K&T, junto con dos resultados experimentales para ausencia de dopado y dopado al 17% en volumen. Podemos observar cómo ambos modelos (D&L y K&T) se ajustan a los resultados experimentales de la resina en ausencia de dopado. Sin embargo, al introducir el dopado el modelo D&L describe mejor los datos. Es importante señalar que, para altas concentraciones, como la mostrada, las suposiciones de dispersión simple en las que se basa el modelo K&T no se cumplen, por lo que es aconsejable emplear el modelo D&L.

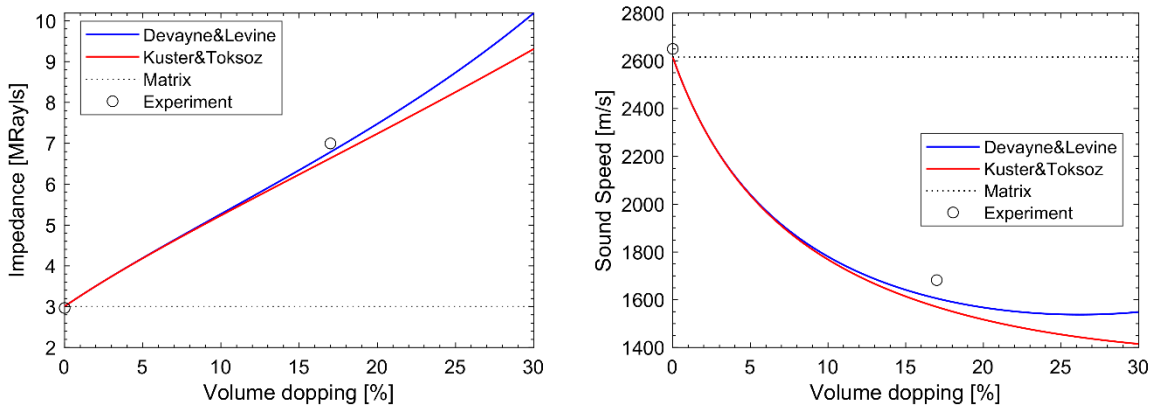


Figura 2 – Velocidad de las ondas longitudinales e impedancia obtenida con el modelo para diferentes valores de dopado.

Tabla 1 – Parámetros efectivos de los compuestos medidos experimentalmente (Exp.) y estimados empleando el modelo Devayne&Levine (D&L).

Resina (Matriz)	Dopante (% volumen)	ρ [D&L] (g/cm^3)	ρ [Exp.] (g/cm^3)	c_L [D&L] (m/s)	c_L [Exp.] (m/s)	Z_L [D&L] (MRayls)	Z [Exp.] (MRayls)
Weicon MS 1000	Sin Dopante	1,10	1,11	2826	2587	3,11	2,87
Weicon MS 1000	Al2O3 (20%)	1,66	1,62	2707	2635	4,49	4,27
Weicon MS 1000	Tungsteno (3%)	1,65	1,68	2358	2327	3,88	3,9
Epo-Tek 301	Sin Dopante	1,12	1,12	2650	2650	2,97	2,97
Epo-Tek 301	Al2O3 (30%)	1,95	1,90	2834	2823	5,54	5,37
Epo-Tek 301	Tungsteno (17%)	4,20	4,16	1610	1682	6,77	7
Epo-Tek 301	CeO2 (18%)	2,43	2,03	2184	2282	5,31	4,63
Royapox 5050 CD	Sin Dopante	1,55	1,52	2962	2657	4,59	4,05
Royapox 5050 CD	Al2O3 (10%)	1,79	1,73	2970	2952	5,30	5,11
Royapox 5050 CD	Tungsteno (12%)	3,67	3,39	2107	2029	7,74	6,89
Royapox 5050 CD	CeO2 (12,6%)	2,32	2,11	2658	2679	6,16	5,66

En la Tabla 1 se muestran los parámetros efectivos de los compuestos medidos experimentalmente (Exp.) y estimados empleando el modelo Devayne&Levine (D&L). Como se observa, el modelo D&L para el material bifásico se ajusta a los resultados experimentales. Pese a que existe un cierto grado de desacuerdo, los errores en la estimación de los modelos para estos materiales presentan una mediana menor del 3% para la velocidad de propagación, y menores del 5% para la estimación de la impedancia. Los errores medios son ligeramente superiores, pero menores del 5% para la estimación de la velocidad de propagación y menores del 7% para la estimación de la impedancia. En los resultados mostrados, se observa un mayor error al emplear cantidades de dopante elevadas (>20% en volumen), sin embargo, proporciones de interés para obtener impedancias cercanas a las óptimas para acoplar un piezo eléctrico y agua, como la resina Epo-Tek 301 al 17% de tungsteno, presentan un error respecto del modelo del 3%.

De manera práctica, se recomienda ensayar distintas concentraciones alrededor del requerido para acabar de ajustar la capa con los valores de impedancia óptima para la aplicación requerida y, de esta manera, calcular el grosor correcto de la capa en base a la velocidad de propagación de las ondas longitudinales medida experimentalmente.

4 Caso práctico

Para el caso que describiremos a continuación, consideraremos como elemento activo del sistema una cerámica dura (PIC-181) fabricada por PI Ceramic de frecuencia de resonancia en modo espesor

650 kHz, espesor de 3,3 mm y diámetro de 65 mm. Como objetivo, diseñaremos una adaptación de impedancia para maximizar la transmisión de ondas acústicas en agua.
Comúnmente, la velocidad de propagación y la densidad de la cerámica podemos encontrarla en la hoja técnica del material. En su defecto, estos parámetros se pueden medir experimentalmente, por ejemplo, mediante la técnica de eco-impulso. Con estos valores, calcularemos la impedancia acústica característica. Teniendo en cuenta que la impedancia acústica del agua es 1,5 MRayls, y de acuerdo con la Ec. (2), la impedancia óptima de la capa de adaptación tendrá una impedancia acústica de unos 7 MRayls.

Este valor es imposible de alcanzar con algunos materiales, ya que las cantidades necesarias de material contaminante es tal que la mezcla no homogeneizaría. Sin embargo, es posible empleando la resina Epo-Tek 301 (Epoxy Technology, Billerica, MA) y tungsteno (Elmet Technologies, Lewiston, Maine) como material dopante, que será la composición que emplearemos en esta demonstración práctica. La velocidad de propagación estimada de la capa la podemos conocer gracias al modelo D&L. Así, podemos calcular que la longitud de la capa para una cerámica de 650 kHz, siguiendo la Ec. (3), es de 647 μm.

4.1 Elaboración de una capa de adaptación

Llegados a este punto conocemos las cantidades adecuadas de resina y dopante para la impedancia requerida. Es aconsejable tener cada elemento por separado ya preparado. Durante el proceso de elaboración necesitaremos lo siguiente: Varilla de vidrio, vasos precipitadores, cuentagotas, bomba de vacío, horno, balanza de precisión, guantes de nitrilo, papel, mondadientes, folio, lámina de poliéster, y cinta adhesiva.

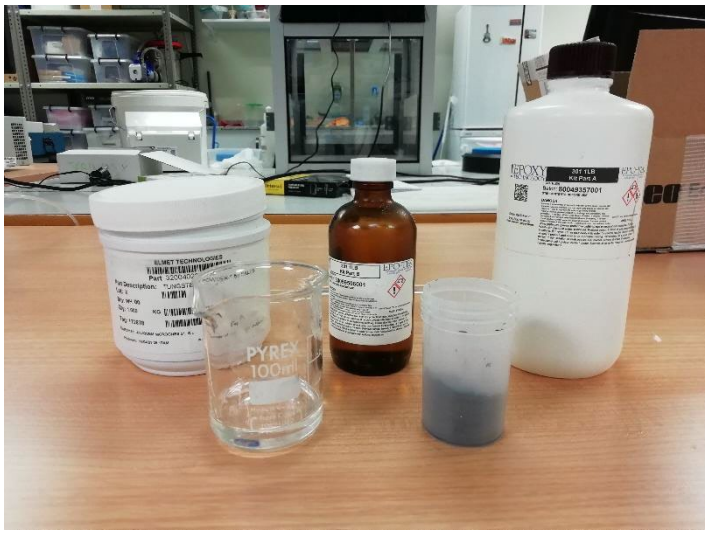


Figura 3 – Materiales para mezcla.

4.2 Proceso de mezclado

En primer lugar, mediremos las cantidades de resina (parte A), endurecedor, o catalizador, (parte B) y material dopante (tungsteno). Posteriormente, seguiremos los siguientes pasos:

I. En un vaso precipitador introducimos la resina (parte A) y, con ayuda de una varilla, empezamos a mezclarlo con el tungsteno poco a poco, a una velocidad constante y no muy alta, ya que

debemos evitar la aparición de burbujas. Es importante tener en cuenta que, para estos valores de impedancia, las cantidades de material dopante son muy altas, por lo que es aconsejable que se vayan añadiendo pequeñas cantidades de tungsteno y mezclándolo con la resina progresivamente. Añadir todo el dopante a la vez puede suponer la no homogeneización de ambas partes, creando una especie de pasta con burbujas que se hará difícil de manipular [7].

II. Con la mezcla bien homogénea, añadimos el endurecedor. Dependiendo de la cantidad total de resina que se haga, puede ser de utilidad utilizar un cuentagotas para medir la cantidad exacta. El endurecedor reduce enormemente la densidad de la mezcla, momento que podemos aprovechar para acabar de mezclar todas las partes, entonces aumentará la viscosidad y comenzará el proceso de curado de la resina.

III. Horneamos a baja temperatura (35°C) durante cinco minutos. Este proceso aumenta la solubilidad. Por lo que aprovecharemos de nuevo para mezclar tras el horneado unos tres minutos.

IV. Introducimos la mezcla final en una cámara de vacío para eliminar las posibles burbujas de aire y otros gases. Tanto entre las mismas partículas del polvo de tungsteno, como durante la agitación en el proceso de mezclado, pueden aparecer burbujas de aire que se han de evitar para la correcta transmisión de las ondas acústicas a través del material. Este proceso genera una excitación en las partículas que conforman la mezcla, provocando resultados adversos, por lo que no es recomendable presiones superiores a 1,5 Pa [8]. El tiempo que podemos dejar la mezcla en vacío dependerá del tiempo de *pot life* de la resina que utilicemos. Este factor nos indica el tiempo que tarda la resina en endurecerse.

4.3 Aplicación de la mezcla en las cerámicas planas y curado posterior

Existen muchos métodos para aplicar la capa a la cerámica. Podemos utilizar moldes para crear las capas con la forma y la altura deseadas y luego adherirlas a la cerámica con algún adhesivo. Pero de esta manera corremos el riesgo de que quede aire entre ambas partes. Además, estamos añadiendo una capa extra en el recorrido que hace la onda que no teníamos previsto en nuestro estudio previo y puede afectar de manera negativa en la eficiencia del transductor. Para frecuencias altas (>3 MHz), las capas son tan pequeñas que no se pueden construir de manera manual. Para ello, pueden mecanizarse mediante técnicas de procesado por control numérico, utilizar técnicas como el *spin coatting* [9] o pulverizadas, creando poco a poco capas nanométricas hasta alcanzar la longitud deseada.

Aquí se propone un método para cerámicas que emiten desde los 250 kHz hasta los 3 MHz. Este método consiste en utilizar unas piezas de apoyo del tamaño de la longitud de la capa en las que apoyaremos la cerámica tras verter la mezcla en una lámina de plástico. Dejando que la resina dopada cure a temperatura ambiente consiguiendo que se pegue a la cerámica sin necesidad de ningún adhesivo extra. A continuación, se detalla el proceso:

I. Preparamos una hoja de papel en la que dibujamos el contorno de la cerámica para que nos sirva de guía. A la hoja, adherimos una lámina de poliéster por uno de los laterales con cinta adhesiva, como si de un libro se tratase. La lámina de poliéster, aparte de ayudarnos a que la resina no se adhiera a otra superficie, hará que el acabado final no tenga imperfecciones de ningún tipo, como se muestra en la Fig. 4 (a).

II. En la lámina de poliéster pegamos con cinta las piezas de apoyo, como se muestra en la Fig. 4 (b). Estas piezas deben tener el grosor de la capa de adaptación. Es importante que los puntos en el que se apoye la cerámica sean los mínimos posibles. Así evitamos tapar el mínimo de superficie de la cerámica, ya que estos puntos de apoyo quedarán enterrados en la misma resina. En nuestro caso hemos impreso estas piezas con resina en una impresora 3D.

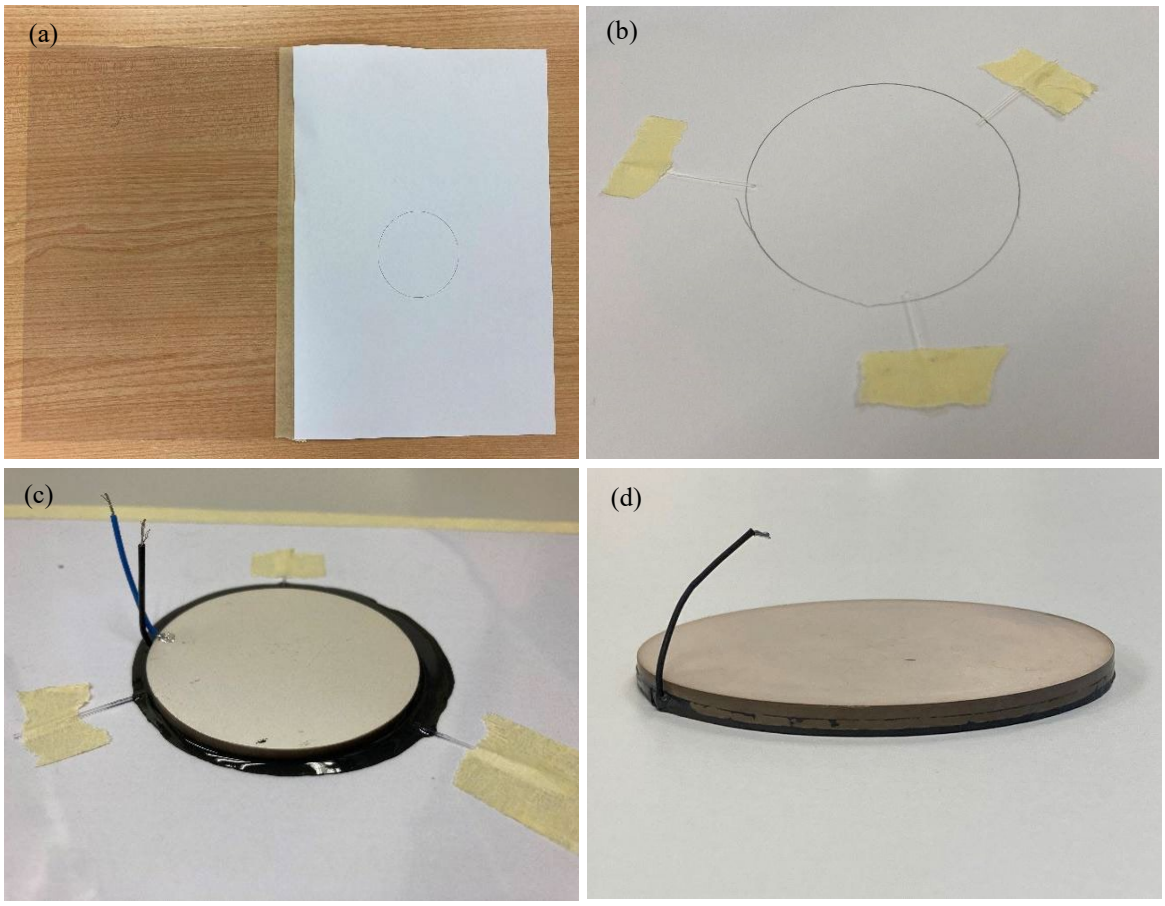


Figura 4 – (a) Folio con lámina de poliéster. (b) Puntos de apoyo para la cerámica. (c) Cerámica distribuyendo la resina en toda su superficie. (d) Cerámica con capa de adaptación.

III. Vertemos la resina encima de la lámina con las piezas adheridas hasta cubrir la superficie dibujada.
IV. Usando unos guantes para no contaminar la cerámica o ensuciarnos con la resina, cogemos la cerámica y la apoyamos en las piezas. En este caso no será necesario, pero es aconsejable utilizar algo que presione la cerámica contra las piezas para asegurarnos que llega a tocar las piezas (con cuidado de no ejercer demasiado peso para no romper la cerámica), como se muestra en la Fig. 4 (c).
V. Depende de la resina, pero pasadas unas horas podremos comprobar que la mezcla empieza a endurecerse. En ese momento podemos ir marcando con un mondadientes alrededor de la cerámica, creando un socavón.
VI. Finalmente, pasado el tiempo de curación, podemos retirar la cerámica con la capa de adaptación adherida. Con ayuda de unos alicates y lija podemos eliminar las imperfecciones alrededor, como se muestra en la Fig. 4 (d).

4.4 Caracterización

Una vez lista la cerámica con su capa de adaptación debemos caracterizarla de manera que podamos asegurar que se ha realizado correctamente. Para ello, podemos medir con un calibrador electrónico el grosor total de la cerámica y la capa. Siendo conocida la altura de la cerámica, es fácil obtener el grosor

final de la capa de adaptación. Otro método puede ser el de utilizar la técnica de eco-impulso de nuevo para medir la longitud recorrida por la onda. Siendo conocida la velocidad de la mezcla y el tiempo de vuelo, es sencillo obtener la longitud gracias a la Ec. (14).

Tabla 2 – Espesor de la capa de adaptación optima y obtenido experimentalmente.

Espesor capa óptima (mm)	Espesor cerámica (mm)	Espesor cerámica + capa (mm)	Espesor capa (mm)
0,647	3,3	3,95 ± 0,054	0,65 ± 0,054

Los resultados del espesor de la cerámica muestran un error por debajo del 1%, por lo que podemos afirmar que se trata de un método simple pero robusto. El error puede deberse a que las piezas utilizadas como soporte no sean exactamente del tamaño deseado. En este caso, las piezas han sido impresas en 3D. Las impresoras utilizadas (Form 3+, FormLabs), presentan una resolución de capa de 0.025 mm, pero es posible que las piezas presenten cierta deformación respecto del modelo, especialmente cuando necesitamos piezas muy finas.

Recomendamos hacer siempre algo de mezcla extra para hacer una pieza para su caracterización, de esta manera conoceremos siempre las propiedades de nuestra mezcla, ya que es difícil acertar con la misma cantidad siempre. Parte del material dopante puede quedarse en el recipiente en el que lo pesamos para luego mezclarlo, por ejemplo.

Otra manera de caracterizar la cerámica es midiendo las curvas de impedancia antes y después de la aplicación de la capa. La Figs. 5 (a, b) muestran en valor absoluto de la impedancia y de la admitancia eléctrica, respectivamente, medida experimentalmente antes y después de aplicar la capa de adaptación. Ambas medidas están realizadas en agua.

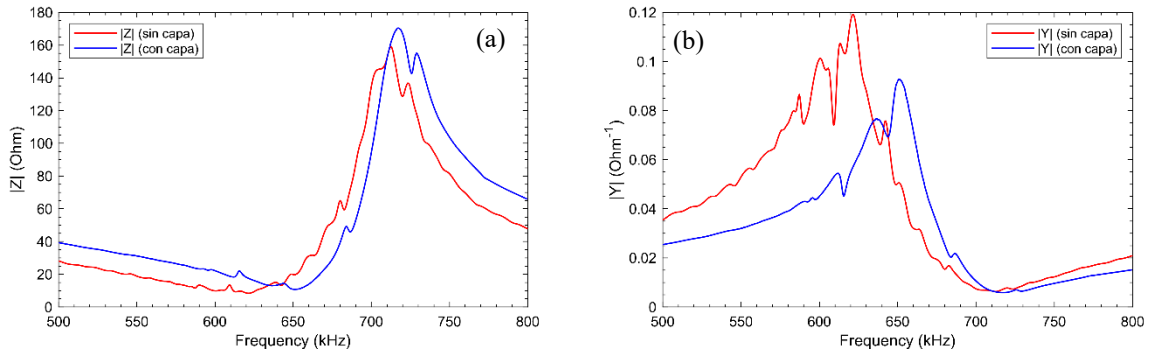


Figura 5 – (a) Curvas de impedancia y (b) admitancia eléctrica medidas experimentalmente.

De esta manera podemos medir y comparar el factor de calidad de ambas curvas. Podemos observar que la curva analizada con la capa de adaptación es más ancha, teniendo un factor de calidad menor. Esto implica que hay más pérdidas ya que se está transmitiendo más energía al medio. También observamos cómo se modifica la frecuencia de resonancia y la aparición de un doble pico por la modulación creada del pulso [11].

5 Conclusión

En el presente documento se detallan los pasos realizados para el diseño, elaboración y caracterización de una capa de adaptación para transductores de ultrasonidos terapéuticos. Se ha detallado el modelo

seguido para la estimación de los parámetros efectivos del material de la capa compuesto por una resina dopada, y se ha comprobado experimentalmente que proporciona valores que se ajustan a las propiedades acústicas del material bifásico. Posteriormente, se ha mostrado un ejemplo de realización, teniendo en cuenta las propiedades acústicas de cada elemento, y un método concreto para la elaboración de la capa, verificando el resultado obtenido.

Se puede comprobar que existe una cierta discrepancia entre el modelo y los valores medidos experimentalmente, de en torno al 5% en el valor de impedancia acústica efectiva. En el caso de que el margen error no fuese aceptable, se debería experimentar hasta conseguir el valor deseado variando la concentración de material dopante utilizado en la mezcla. Una vez obtenido el valor deseado y caracterizado para conseguir una mejor eficiencia en la transmisión de energía mecánica.

Agradecimientos
Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación español con la subvención RYC2021-034920-I, la Agencia Estatal de Investigación con las subvenciones PID2022-142719OB-C21 y CNS2023-145707 financiadas por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, por la Agencia Valenciana de la Innovació proyectos INNVA2/2022/11, INNVA1/2022/37, INNVA1/2020/92, y por la Generalitat Valenciana contrato CIAICO/2023/052 e IDIFEDER/2021/004.

Agradecemos a Miguel Jesús García Hernández por compartir con nuestro equipo su experiencia, conocimiento y su saber hacer en la elaboración y diseño de transductores de ultrasonidos, durante colaboraciones en proyectos científicos, pero también de manera desinteresada. El método de fabricación descrito en la sección 4.3, que venimos depurando durante varios años, fue compartido inicialmente por MJGH con nuestro equipo.

Referencias

[1] Jacques Curie and Mme Pierre NULL Curie. Phénomènes électriques des cristaux hémièdres à inclinées. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1(1):245–251, 1882.

[2] Peter R Hoskins, Kevin Martin, and Abigail Thrush. *Diagnostic ultrasound: physics and equipment*. CRC Press, 2019.

[3] Mark Draheim and Wenwu Cao. Finite element and experimental study of impedance matching layer optimization. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 04 1997.

[4] FB STUMPF. Analytical acoustics(book). *Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, Inc., 1980. 300 p,* 1980.

[5] A. J. Devaney and H. Levine. Effective elastic parameters of random composites. *Applied Physics Letters*, 37(4):377–379, 1980.

[6] F. Adrián F. Tojo. Funciones de green para ecuaciones diferenciales con involuciones. 11 2014.

[7] Masahiro Kozako, Yoshimichi Ohki, Masanori Kohtoh, Shigemitsu Okabe, and Toshikatsu Tanaka. Preparation and various characteristics of epoxy/alumina nanocomposites. *Ieej Transactions on Fundamentals and Materials,* 126:1121–1127, 01 2006.

[8] Haifeng Wang, Timothy Ritter,Wenwu Cao, and K. Shung. Passive materials for high-frequency ultrasound transducers. *Proc SPIE,* 3664:35–42, 06 1999.

[9] Zhou QF, Cha JH, Huang Y, Zhang R, Cao W, Shung KK. Alumina/epoxy nanocomposite matching layers for high-frequency ultrasound transducer application. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2009,* 56, 213–219.

[10] A. J. Devaney. Nonuniqueness in the inverse scattering problem. *Journal of Mathematical Physics,* 19:1526–1531, 1977.

[11] Persson, H.W., Hertz, C.H.: Acoustic impedance matching of medical ultrasound transducers. *Ultrasonics* 23(2), 83–89 (1985)