



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Desarrollo y caracterización de un transductor ultrasónico  
impreso en 3D

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e  
Imagen

AUTOR/A: Zubiaurre Quesada, Ander

Tutor/a: Camarena Femenia, Francisco

Cotutor/a: Cebrecos Ruiz, Alejandro

Cotutor/a externo: RODRIGUEZ GARCIA, JUAN JOSE

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# Desarrollo y caracterización de un transductor ultrasónico impreso en 3D

---

Autor:

**Zubiaurre Quesada, Ander**

Tutor:

**Camarena Femenia, Francisco**

Cotutor:

**Cebrecos Ruiz, Alejandro**

Cotutor externo:

**Rodríguez García, Juan José**

## RESUMEN

---

El presente trabajo estudia el uso de la tecnología de impresión 3D en transductores piezoeléctricos para aplicaciones de ensayos no destructivos (NDT). El estudio compara la sensibilidad, ancho de banda y calidad de las señales de transductores impresos en 3D con otros más convencionales basados en resinas y modelos comerciales.

Los resultados revelan que los transductores impresos en 3D ofrecen un rendimiento comparable en términos de sensibilidad y ancho de banda. Entre las ventajas están el ahorro de costos y tiempo a cambio de una ligera pérdida de sensibilidad. Además, este estudio proporciona conocimientos valiosos para optimizar transductores, sugiriendo la impresión 3D como una alternativa viable con beneficios potenciales en eficiencia y calidad de producción.

---

**Palabras clave:** transductor, capa de adaptación, impresión 3D, ancho de banda, sensibilidad

## ABSTRACT

---

This research studies the use of 3D printing technology in piezoelectric transducers for non-destructive testing (NDT) applications. The study compares sensitivity, bandwidth, and signal quality of 3D printed transducers with more conventional resin based counterparts and commercial models.

Results reveal that 3D printed transducers offer comparable performance in terms of sensitivity and bandwidth. Advantages include cost and time savings in exchange for a slight loss of sensitivity. Furthermore, this study provides valuable insights for transducer optimization, suggesting 3D printing as a viable alternative with potential benefits in efficiency and production quality.

---

**Key words:** transducer, matching layer, 3D printing, bandwidth, sensitivity

# ÍNDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	1
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>2 TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 ELEMENTOS DEL TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 ELEMENTO ACTIVO.....	6
2.2.2 ELEMENTOS PASIVOS .....	7
<b>2.3 TEST NO DESTRUCTIVO DE MATERIALES (NDT) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 COMPLICACIONES ASOCIADAS AL USO DE RESINAS Y LA IMPRESIÓN 3D.....</b>	<b>14</b>
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN TRANSDUCTORES A ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 CONFIGURACIÓN Y METODOLOGÍA DEL PROCESO DE MEDIDA .....</b>	<b>19</b>
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 ANCHO DE BANDA.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 SENSIBILIDAD.....</b>	<b>28</b>
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 CONCLUSIONES AL ESTUDIO .....</b>	<b>35</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>37</b>
<b>7 ANEXO.....</b>	<b>39</b>
<b>7.1 CÓDIGO MATLAB UTILIZADO .....</b>	<b>39</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN

El uso de transductores ultrasónicos en campos como son la medicina, industria e investigación, así como para aplicaciones de ensayos no destructivos (NDT) ha demostrado ser altamente beneficioso. Estos dispositivos son capaces generar y detectar ondas de ultrasonido, proporcionando información valiosa sobre materiales y objetos sin alterar su estado.

El rendimiento de los transductores está estrechamente ligado a la calidad de los diferentes elementos que lo constituyen, de entre ellos la capa de adaptación o *matching layer* colocado en la parte frontal del dispositivo, en el cual se centrará más en profundidad el estudio. El conjunto de estos elementos es clave en la optimización de la sensibilidad y ensanchamiento del ancho de banda que es fundamental para obtener una respuesta fiable y precisa en pruebas NDT.

Actualmente, el uso de resinas es casi un estándar en la fabricación de los elementos pasivos, más concretamente en las capas de adaptación. Sin embargo, esta elección no está exenta de problemas o complicaciones, especialmente en el procesado del material. Se requiere minuciosidad y supervisión en cada una de las etapas para evitar imperfecciones que puedan afectar negativamente la calidad y eficiencia del transductor.

Los avances en la tecnología de impresión 3D abren nuevas posibilidades en la fabricación de estos elementos pasivos. Esta tecnología puede superar las limitaciones asociadas al uso de resinas, al reducir el tiempo de procesamiento y, por ende, los costos de producción. Además, ofrece la ventaja de una mayor capacidad de personalización y repetibilidad en los procesos de manufactura.

La justificación del estudio se basa en la posibilidad de implementar la impresión 3D en la fabricación de transductores piezoeléctricos como una alternativa a las resinas utilizadas actualmente en la industria. La investigación buscará determinar si esta tecnología puede ofrecer resultados comparables o incluso superiores, brindando ventajas significativas en términos de eficiencia y calidad en la producción de estos dispositivos para aplicaciones de ensayos no destructivos.

## 1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar y caracterizar distintos transductores piezoeléctricos de ultrasonidos para el ámbito de ensayos no destructivos de materiales. Se estudiarán las respuestas de los nuevos transductores fabricados mediante técnicas de impresión 3D estereolitográficas, y se compararán con otros más tradicionales que hacen uso de resinas, además de los comerciales sacados directamente del mercado.

Para lograr este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar distintos tipos de transductores piezoeléctricos, más concretamente los fabricados mediante técnicas de impresión 3D estereolitográficas, así como transductores convencionales que utilizan resinas y transductores comerciales disponibles en el mercado.
- Calcular grosores necesarios de las capas de adaptación de distintos materiales y analizar su efecto en el resultado final.
- Realizar pruebas y caracterizar el rendimiento de los transductores 3D impresos en términos de sensibilidad, ancho de banda y calidad de la señal.
- Comparar el rendimiento de los transductores 3D impresos con otros más convencionales que utilizan resinas para sus elementos pasivos, evaluando aspectos como la sensibilidad, el ancho de banda y la calidad de la señal.
- Evaluar y comparar las propiedades de sensibilidad y ancho de banda de un mismo transductor sin ningún tipo de capa de adaptación y una vez acoplada la capa de adaptación.
- Analizar la viabilidad y las limitaciones del uso de la tecnología de impresión 3D en la fabricación de transductores piezoeléctricos, considerando aspectos como el costo, y la reproducibilidad.

## 2 TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

Antes de adentrarse en el estudio que se plantea, es importante comprender la función de las distintas partes y fundamentos teóricos en los que se basan estos transductores ultrasónicos. En esta sección se explorarán y definirán conceptos clave como pueden ser los fundamentos de la piezoelectricidad, y las funciones de los diferentes elementos activos y pasivos que componen los transductores, así como la importancia de la capa de adaptación mecánica.

Por lo tanto, se pasa a establecer a continuación las bases necesarias para poder comprender en profundidad el desarrollo y la comparación de transductores impresos en 3D en las siguientes secciones.

### 2.1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO

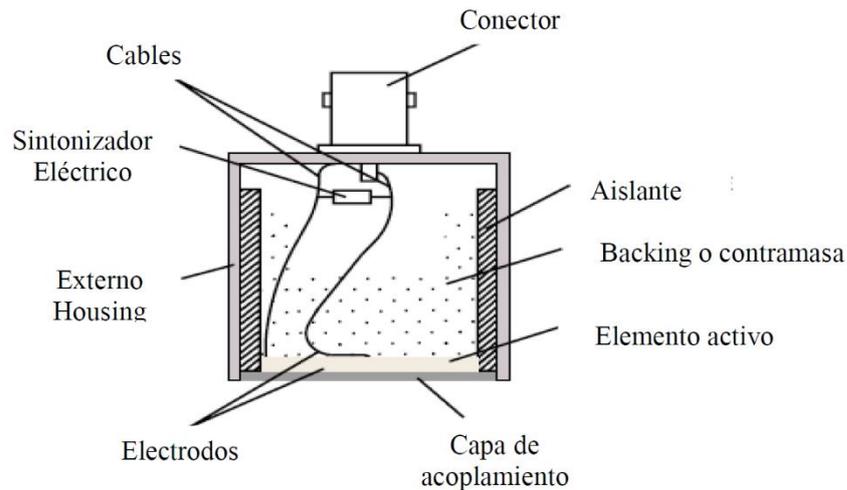
El transductor ultrasónico es a grandes rasgos un dispositivo que transforma la energía eléctrica en vibraciones mecánicas de alta frecuencia, conocidas como ultrasonidos, y viceversa. Su funcionamiento se basa en el fenómeno piezoeléctrico presente en ciertos materiales, como el cuarzo y algunas cerámicas, que tienen la capacidad de deformarse cuando se someten a un voltaje eléctrico y, a su vez, generar una corriente eléctrica cuando son mecánicamente deformados. Gracias a esta propiedad, los transductores piezoeléctricos pueden generar vibraciones de alta frecuencia o convertir las vibraciones mecánicas en señales eléctricas detectables.

El valor de estos transductores radica en su habilidad para generar y detectar ondas ultrasónicas, que son ondas de alta frecuencia por encima del rango audible para los seres humanos, es decir, con frecuencias superiores a 20 kHz. Estas ondas tienen propiedades únicas que los hacen valiosos en diversas aplicaciones, como la medicina, la industria, la investigación, entre otras. Su utilización proporciona beneficios significativos en términos de diagnóstico, control de calidad, inspección y seguridad en numerosos campos.

### 2.2 ELEMENTOS DEL TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO

El transductor piezoeléctrico está compuesto por varios elementos, siendo el elemento activo el piezoeléctrico, y elementos pasivos como el *backing*, la carcasa externa, el aislante y la capa de acoplamiento, entre otros. Estos elementos se pueden apreciar en la siguiente

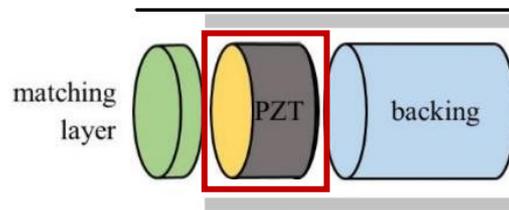
figura [1]. Se pasará a explicar los más importantes.



**Figura 2.1** Esquema y partes de un transductor piezoeléctrico. [1]

## 2.2.1 ELEMENTO ACTIVO

El elemento activo es vital en la composición del transductor, ya que constituye el corazón de toda la tecnología utilizada. Gracias al efecto piezoeléctrico presente en este componente, es posible generar las vibraciones para emitir ultrasonidos o registrar las señales eléctricas producidos por ondas ultrasónicas que llegan al transductor.



**Figura 2.2** Posicionamiento de los diferentes elementos del dispositivo ultrasónico [11]. Elemento marcado en rojo.

Este fenómeno piezoeléctrico se produce por la estructura cristalina de determinados cristales, que carecen de centro de simetría [5]. Cuando se les aplica una fuerza externa, ya sea una compresión o tensión mecánica, su estructura interna se deforma empujando las cargas positivas y negativas hacia los bordes generando así una diferencia de potencial eléctrico [7].

En la siguiente imagen se muestra el ejemplo más típico de un cristal, el cuarzo, donde se ve cómo en el estado natural los átomos de silicio y oxígeno se distribuyen uniformemente [14].

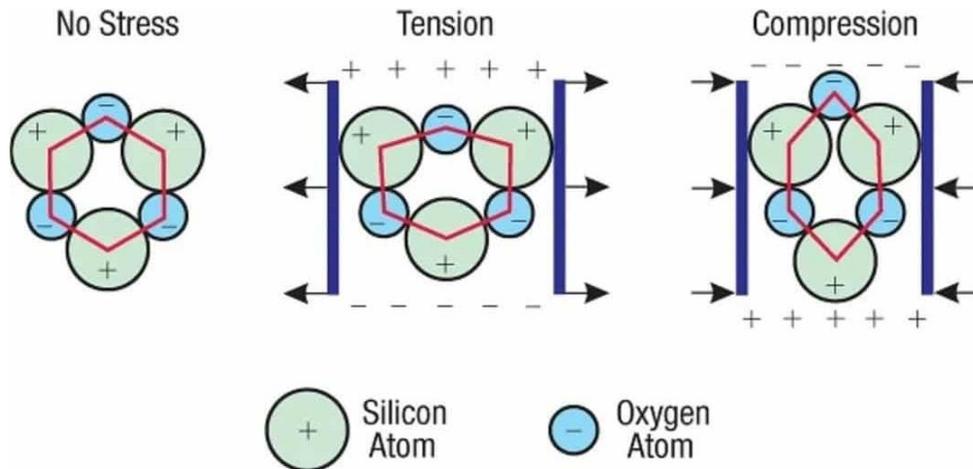


Figura 2.3 Estructura y deformaciones del cuarzo. [11]

El aplicar una compresión o expansión distribuye estas cargas acumulando las positivas en un lado y las negativas en el opuesto creando así una diferencia de potencial. Añadiendo electrodos a ambos lados del piezoeléctrico y conectándolos a la corriente eléctrica mediante cables conductores se es capaz de obtener una corriente eléctrica de la deformación.

Por supuesto se puede conseguir el efecto contrario aplicando una tensión en los electrodos de los extremos. Si se va alternando de polaridad, la continua deformación hará que la vibración se traduzca en una onda de ultrasonidos.

Las propiedades físicas del material piezoeléctrico determinarán la resonancia natural a la que vibra el transductor que es condicionada por el tipo de material usado, la geometría y el espesor de la pieza [2].

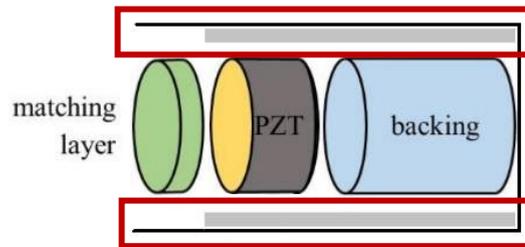
En resumen, el elemento activo, gracias al efecto piezoeléctrico, juega un papel fundamental en el funcionamiento del transductor piezoeléctrico, permitiendo la generación y detección de ultrasonidos, convirtiéndolo en el componente más esencial.

### 2.2.2 ELEMENTOS PASIVOS

Entre los elementos pasivos, estarían entre otros la carcasa externa junto con el aislante, el *backing*, y la capa de adaptación. Su funcionalidad es la de aportar una mejor respuesta o mayor optimización del rendimiento del transductor para el área de aplicación a la que esté enfocada.

### 2.2.2.1 CARCASA EXTERNA Y AISLANTE

La carcasa o el *housing*, es el elemento que aporta la solidez al transductor, proporcionando flexibilidad al dispositivo sin que se vea afectada la señal a emitir o recibir mientras se esté en uso. A su vez da pie a la interconexión de los distintos elementos que aumentan la eficiencia del aparato. Junto con el aislante acústico evita los zumbidos o las vibraciones no deseadas del elemento piezoeléctrico [8].



**Figura 2.2** Posicionamiento de los diferentes elementos del dispositivo ultrasónico [12]. Elemento marcado en rojo.

La carcasa del transductor puede estar hecha de distintos materiales según el uso. La elección del material depende de diversos factores como el costo, la aplicación o requisitos mecánicos, los materiales metálicos suelen ser más sólidos y duraderos, mientras que los materiales plásticos ofrecen ligereza y menores costos.

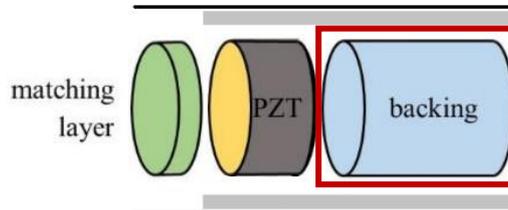
En cuanto al material aislante acústico, este va colocado entre el elemento piezoeléctrico y la carcasa con intención de eliminar los zumbidos o vibraciones indeseadas derivados del piezo que se transmiten al *housing*. La energía mecánica producida por el cristal es absorbida y disipada de este modo protegiendo el sistema de efectos de resonancia [8].

En general, el diseño de estos dos elementos confiere al transductor de una optimización de su funcionamiento según el ámbito de utilización. La buena elección de los materiales empleados ayuda a mejorar la eficiencia a la par que se da protección a las resonancias que puedan generar dándole también una base al transductor, y posibilitando el *backing* entremedias del piezoeléctrico y la carcasa.

### 2.2.2.2 BACKING

Como se ha explicado anteriormente en el elemento activo, la deformación mecánica del piezoeléctrico produce ondas ultrasónicas que son emitidas por ambos extremos, característica que resulta interesante y existen diferentes maneras de atajar el problema o aprovecharlo en beneficio propio.

En este aspecto, el *backing*, situado en la parte trasera del transductor y contenido por la carcasa externa, es fundamental en la optimización del dispositivo, y son diversos los enfoques con los que se puede trabajar dependiendo de la impedancia acústica del material utilizado.



**Figura 2.2** Posicionamiento de los diferentes elementos del dispositivo ultrasónico [12]. Elemento marcado en rojo.

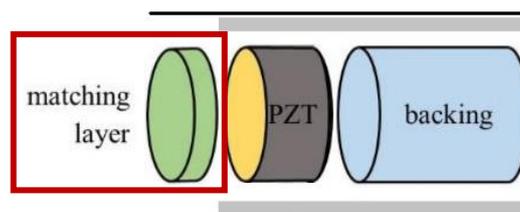
El *backing* puede estar compuesto por un material con una impedancia menor a la del piezoeléctrico con el propósito de evitar que la señal ultrasónica se propague hacia la parte trasera y, en consecuencia, que llegue de vuelta por reflexión al piezoeléctrico. Esto deriva en una sensibilidad mayor a costa de obtener un ancho de banda menor [9].

En comparativa, un *backing* de mayor impedancia acústica, mejora el ancho de banda al igualar la impedancia entre distintas capas, pero reduce la sensibilidad por la baja eficiencia en emisión y recepción [5] [9].

En definitiva, las impedancias acústicas de los materiales resultan de gran interés en la construcción de transductores piezoeléctricos. El ser capaz de ajustarlos a los objetivos presentes puede aportar mejores resultados en la optimización y eficiencia, no solo en el elemento pasivo del *backing*, sino más significativamente en la capa de adaptación frontal del transductor.

### 2.2.2.3 CAPA DE ADAPTACIÓN

Se ha mencionado la impedancia acústica de los materiales, posiblemente la característica más a tener en cuenta en la tecnología de los transductores piezoeléctricos. La capa de adaptación tiene como función solucionar la desadaptación de impedancias entre los medios, debido a la necesidad de una buena transferencia de señal.



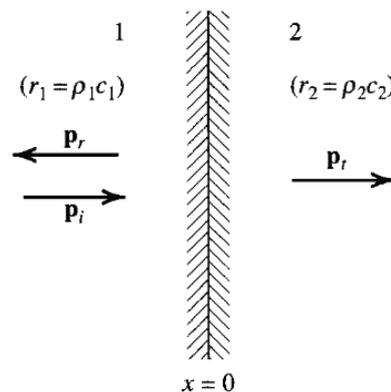
**Figura 2.2** Posicionamiento de los diferentes elementos del dispositivo ultrasónico [12]. Elemento marcado en rojo.

La impedancia acústica es básicamente la resistencia que opone un material determinado a las ondas que se propagan por dicho medio, lo que llega a ser el equivalente a la impedancia eléctrica en los circuitos eléctricos. Para calcular la impedancia característica de un material dado, entran en juego la densidad ( $\rho$ ) y la velocidad de propagación de las ondas ( $c$ ) en el material, su producto da como resultado la impedancia acústica [3].

$$z_0 = \rho \cdot c \quad (1)$$

El medio al que se quiere transmitir una onda ya sea aire, agua o cualquier otro objeto, y un material como es el caso del piezoeléctrico, tienen distintas impedancias acústicas. Esto se traduce en que la transmisión de la onda no será igual por ambos medios, lo que hará que parte de la energía incida en el nuevo medio y parte de la energía se refleje [3].

Se muestra en la siguiente figura, siendo  $r_1$  y  $r_2$  las impedancias de distintos medios y una onda incidente perpendicular al plano de separación de ambos medios, y sabiendo que la energía incidente es la suma entre la transmitida y la reflejada.



**Ilustración 2.4** Transmisión de energía incidente en dos medios de impedancia  $r_1$  y  $r_2$

Siendo el coeficiente de transmisión, a incidencia normal [3]:

$$T = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (2)$$

Se puede llegar a la conclusión de que cuanto más cerca estén las impedancias de los dos medios entre ellas mayor será la energía transmitida. De igual forma, menor será la energía reflejada atendiendo al coeficiente de reflexión [2]:

$$R = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

(3)

Una gran diferencia de impedancias hará que gran parte de la onda incidente se refleje de vuelta.

Dicho esto, la impedancia acústica del elemento activo tiende a ser mucho mayor al medio de propagación de la onda, por lo que es indispensable la búsqueda de soluciones a la desadaptación de impedancias si se quiere conseguir una buena emisión de señal al medio de interés.

La capa de adaptación o *matching layer*, que sirve como solución al problema, es simplemente una capa intermedia situada entre el piezoeléctrico y el medio transmisor. Se busca con ello una transferencia eficiente de la señal, evitando la reflexión.

Para ello, es necesario que la onda emitida al medio de propagación por la capa de adaptación sea la suma de las contribuciones debidas a las múltiples reflexiones [5]. Un espesor de capa de un cuarto de la longitud de la onda acústica, que no es más que la velocidad de propagación del medio dividida por la frecuencia fundamental de emisión, deriva en que las reflexiones tengan la misma fase en la salida [5] [10].

$$T = \frac{\lambda}{4}; \quad \text{con} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

(4)

(5)

En su defecto, aunque implique una atenuación mayor, también es posible una configuración que siga lo siguiente [5]:

$$T = (n + 1) \frac{\lambda}{4}; \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

(6)

Además, para que la transmisión de energía a través del *matching layer* sea la máxima, realizando la media geométrica de  $Z_p$  y  $Z_m$ , impedancias del piezoeléctrico y medio de transmisión respectivamente, obtenemos la impedancia acústica óptima de la capa de adaptación  $Z_{ML}$  [10]:

$$Z_{ML} = \sqrt{Z_p Z_m}$$

(7)

En conclusión, se ha comprobado la necesidad de la capa de adaptación para la utilidad del elemento activo del transductor piezoeléctrico, que, junto con el *backing*, la carcasa externa y el aislante, moldearán la frecuencia central, el ancho de banda, la sensibilidad, y en definitiva la eficiencia de todo el sistema.

## 2.3 TEST NO DESTRUCTIVO DE MATERIALES (NDT)

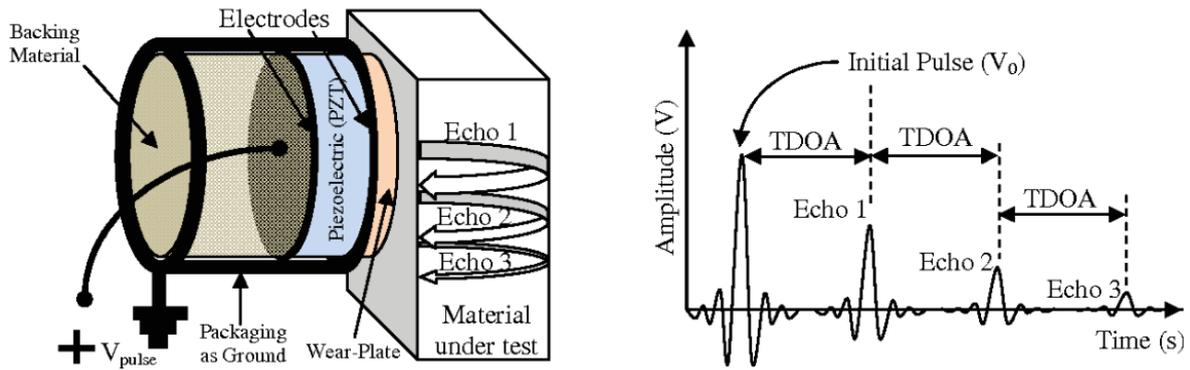
Con lo visto hasta ahora, es importante tener en cuenta todos los aspectos referentes a la transmisión de ondas por distintos medios o entre distintos medios, y las desadaptaciones de impedancias creadas por las características físicas de los materiales contiguos.

Las tres capas de *backing*, piezoeléctrico y capa de adaptación han de relacionarse en este aspecto para poder transmitir las señales de una manera eficiente. La capacidad del elemento activo de poder emitir ultrasonidos, y poder recibirlos correctamente transformándolos en señal eléctrica se hace plausible gracias a la combinación de estos elementos.

Todo ello confluye a entender su valía en el campo de las pruebas no destructivas NDT. La detección de defectos y evaluación de materiales, en sistemas de tuberías o estructuras constructivas como pueden ser los cimientos de un puente, es posible sin verse comprometida la integridad de los objetos a estudio.

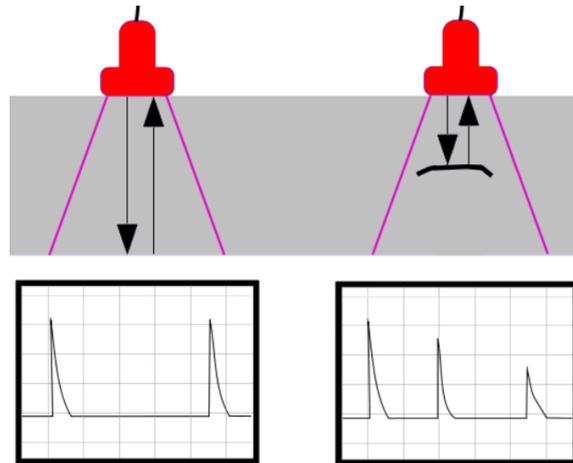
La idea del funcionamiento básico del test no destructivo de materiales está en que los transductores emitan ondas por el medio material que se quiere evaluar, y el eco reflejado en el extremo del material aporte información sobre las propiedades y la estructura interna del mismo.

La técnica de ultrasonido se basa en el principio de que las ondas emitidas rebotarán en los bordes y defectos dentro del material debido al cambio de impedancias, generando un eco que es detectado nuevamente por el transductor [12]. Al conocer las propiedades de un material y el grosor del objeto en cuestión, es posible calcular el tiempo que tarda este eco en regresar.



**Figura 2.5** Ecos consecutivos de respuesta a la emisión de un pulso. La onda queda rebotando en el material atenuándose en el tiempo. [15]

Si el eco regresa en un tiempo menor al esperado, es una indicación clara de la presencia de un defecto o una grieta en el material. Lo destacable es que este proceso se lleva a cabo sin causar ningún daño a la infraestructura bajo evaluación.



**Figura 2.6** Afección del desperfecto en el material en la respuesta obtenida [16]

En este contexto, la frecuencia y el ancho de banda de los transductores son factores cruciales. Los transductores emiten ondas ultrasónicas a una frecuencia determinada. Un mayor ancho de banda y sensibilidad mejoran la calidad de la señal capturada, lo que a su vez permite detectar con mayor precisión pequeños defectos y detalles en el material.

Un mayor rango de frecuencias hará que sea más fácil la adecuación al material donde se propaga la onda, además de ayudar en la detección de desperfectos que aparecen en frecuencias muy concretas.

La sensibilidad, relacionada directamente con la capacidad del transductor a emitir una señal con una buena amplitud, hará que la atenuación afecte en menor medida por lo que será más fácil detectar irregularidades claras.

En resumen, el uso de la tecnología de ultrasonidos resulta muy útil en aplicaciones NDT, donde se aprovechan las cualidades aportadas por los transductores piezoeléctricos. Un buen ancho de banda y sensibilidad determina la efectividad de estos, permitiendo la detección precisa de pequeños defectos y detalles en los materiales evaluados.

## 2.4 COMPLICACIONES ASOCIADAS AL USO DE RESINAS Y LA IMPRESIÓN 3D

Una vez analizadas las partes más importantes que forman un transductor y su aplicación en ensayos no destructivos, de ahora en adelante la investigación se centrará más en profundidad en el elemento de adaptación de impedancias, en su composición, problemas, soluciones, implicaciones y por último resultados.

Hay una gran variedad de materiales utilizados en el diseño de las capas de adaptación. Entre los polímeros se encuentran las resinas epoxi, ampliamente usadas debido a su bajo costo, disponibilidad y propiedades acústicas. Sin embargo, su mayor inconveniente radica en la producción o procesado de la misma, así como en su reproducción.

Para buscar una solución óptima, el *matching layer* ha de ser un elemento poco absorbente, uniforme, de un grosor preciso, y sobre todo de una impedancia muy definida que se encuentra en la media geométrica entre el elemento activo y el medio al que transmitir.

La impedancia del material de las resinas comerciales existentes suele quedar muy por debajo de la necesaria (3 o 4 MRayls), y son necesarios valores entre 6 y 7 MRayls, por lo que han de utilizarse materiales de partícula muy fina en el dopado de las resinas para obtener los valores adecuados.

Estos materiales han de homogeneizarse en el epoxi durante su propio procesado de elaboración y curado, lo cual llega a ser complicado y difícil de estandarizar. Además de que aumentan la absorción del material.

También han de tenerse en cuenta los inconvenientes de los tiempos del procesado, las posibles burbujas de aire que pueden aparecer durante el proceso, y la complejidad de la adhesión de la capa sobre el piezoeléctrico.

Por todo ello, es sumamente complejo obtener buenos resultados del proceso, y en todo caso no augura repetibilidad. Estas complicaciones pueden dificultar el proceso de construcción del transductor y afectar la calidad del producto final. Por eso, gracias a la aparición de nuevos productos de alta rigidez en el mercado de la impresión 3D llegan a

ofrecer una alternativa interesante en la mejora de eficiencia, reducción de costos y repetibilidad en la fabricación de estos transductores.

Para el caso del presente trabajo se quiere estudiar la respuesta de estos nuevos materiales con respecto a materiales más convencionales como son las resinas epoxi, ya que eliminan la aparición de las dificultades comentadas.

Este es uno de los primeros trabajos donde se estudia el uso la impresión 3D como sustitutivo a resinas convencionales, su buena respuesta significaría un gran avance en el campo, sobre todo en la producción y reproducción de los transductores piezoeléctricos.

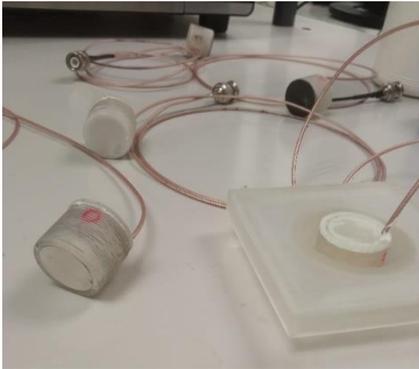
### 3 METODOLOGÍA

En este apartado, se describirá la metodología utilizada en el estudio de los transductores ultrasónicos. Se presentarán los diferentes tipos de transductores empleados, así como sus propiedades físicas, más concretamente las de las capas de adaptación utilizadas en aquellos diseñados y construidos en el laboratorio, y un modelo comercial. Además, se explicará detalladamente cómo se llevaron a cabo las pruebas y mediciones para obtener los datos necesarios.

#### 3.1 SELECCIÓN Y PREPARACIÓN TRANSDUCTORES A ESTUDIO

Entre los transductores comerciales, se utilizó el Olympus Panametrics V392 [17], con un rendimiento confiable en aplicaciones de ensayos no destructivos. Este transductor tiene una frecuencia central de 1 MHz, lo que lo convierte en la opción ideal para la comparativa dado que todos los transductores a estudio operan alrededor de 1 MHz.

En cuanto a los transductores fabricados en el laboratorio, exceptuando las capas de adaptación, todos los demás elementos poseen las mismas propiedades, utilizan la cerámica PIC 255 de PI Ceramic [18] con frecuencia fundamental de 1 MHz. Disponen de una carcasa externa hecha con impresión 3D y carecen de *backing*. Los electrodos a ambos lados del piezo están soldados a los cables de corriente y acoplados a un conector BNC. Solamente difieren las capas de adaptación.



**Figura 3.1** Un transductor de cada tipo. Sin capa (izquierda), con capa 3D (detrás), con capa epoxi (al fondo).



**Figura 3.2** Dos transductores con capa epoxi, y uno con capa 3D (central).

Por otro lado, para la comparativa con los transductores de laboratorio, se utilizaron un total de 6 transductores: 2 con una capa de adaptación de resina de epoxi ya implementada, 2 sin ningún tipo de capa de adaptación, y otros 2 con capa impresa en 3D. Realmente estas últimas fueron las mismas que no llevaban capa pero a los que se les adhirió más tarde, con el fin de evaluar los resultados de esta última configuración, obteniendo así 6 muestras, 2 de cada tipo, junto con el transductor comercial Panametrics V392.

MUESTRAS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
TRANSDUCTOR	Sin capa de adaptación		Con Capa de adaptación 3D		Con Capa de adaptación EPOXI		Panametrics V392
FRECUENCIA DE TRABAJO	1 MHz						
IMPEDANCIA CAPA	--		5,9 MRayls		6,9 MRayls		
GROSOR CAPA			0,87 mm		0,43 mm		

**Tabla 3.1** Muestras utilizadas y propiedades de las capas.

Los transductores con capa de adaptación de resina de epoxi se espera que proporcionen una transferencia de señal eficiente. Lo que hace realmente interesante y útil a este material son las características físicas que posee, específicamente la impedancia resultante de 6,9 MRayls, muy cercana a la ideal (6,4 MRayls en el caso de estudio), y lo hace con un requerimiento de grosor de capa pequeño (0,43 mm) en comparación con las capas 3D, lo cual ayuda a evitar atenuaciones en la señal.

En cuanto a los *matching layer* impresos en 3D, usan una tinta reciente en el mercado llamada Rigid 10K con una impedancia de 5,9 MRayls también cercana a los 6,4 MRayls. En este caso, se ha comprobado que tampoco se quedan lejos de la impedancia óptima, aunque

necesitan ser diseñados con mayor grosor (0,87 mm), prácticamente el doble que las de epoxi, con lo que la atenuación debido al material será mayor. En base a las características de este material se espera que esta opción ofrezca una alternativa prometedora y más eficiente en términos de costos y tiempos de fabricación a costo de una atenuación mayor.

Las propiedades de interés utilizadas para los cálculos de las impedancias y los grosores de las capas para el diseño de estas, sabiendo que se va a emitir en agua son las siguientes:

PROPIEDAD	MAGNITUD	PIC 255	RIGID 10K	EPOXI	AGUA
Densidad	$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	7800	1700	4060	1000
Velocidad de propagación	$c \left(\frac{m}{sg}\right)$	3520	3470	1700	1500
Impedancia	$z (MRayls)$	27,5	5,9	6,9	1,5

**Tabla 3.2** Propiedades físicas del piezo PIC 255, tinta 3D Rigid 10K, material epoxi y agua respectivamente

Conociendo la impedancia del piezoeléctrico, obtenido de la información aportada por el fabricante, y la impedancia del medio al que se va a emitir, aplicando la media geométrica de ambos (7), se obtiene la impedancia óptima de la capa de adaptación.

El valor obtenido se encuentra en torno a 6,4 *MRayls* que es justo la media aritmética de los valores de impedancia de los materiales Rigid 10K (5,9 *MRayls*) y epoxi (6,9 *MRayls*).

En cuanto al grosor necesario de las capas, queriendo lograr un grosor de un cuarto de la longitud de onda acústica de utilidad (4), sabiendo que el piezoeléctrico opera a 1 MHz, y a partir de la información de velocidad de propagación de onda de ambos materiales, se obtiene la longitud de onda acústica (5), y por consiguiente el grosor óptimo necesario (4).

Los valores adquiridos son de 0,43 mm para la resina epoxi, y 0,87 mm para el material Rigid 10K. En vista de los resultados es intuitivo pensar que las atenuaciones que afectan en los materiales se verán más influyentes en la tinta 3D, puesto que la onda debe recorrer una mayor distancia en el medio.

En cualquier caso, como las capas de adaptación de resina epoxi ya estaban adheridas al transductor de antes, solo ha sido necesario operar con las capas recién impresas. En el proceso de adhesión de las capas, se ha comprobado que el grosor de las impresiones 3D son las correctas, en una de ellas ha sido necesario el lijado hasta obtener el requerido de 0,87 mm, por lo que se ha procedido con el mayor cuidado posible.

Una vez todas las capas con las medidas adecuadas se ha procedido al pegado con un pegamento líquido tipo Loctite haciendo presión dentro de las posibilidades para que la

capa de la sustancia pegajosa sea mínima.

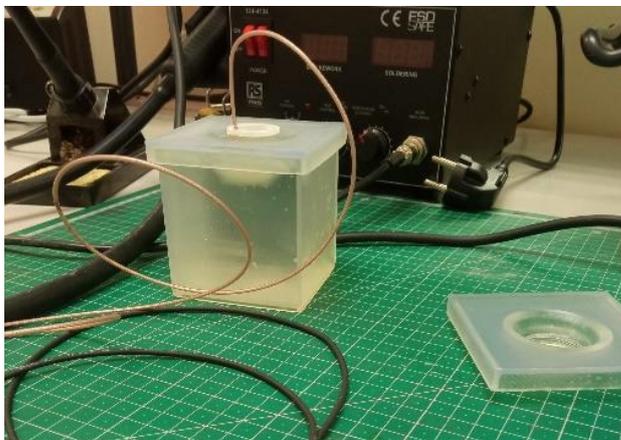
Hay que recalcar que esto supone una capa extra con todo lo que ello implica en la desadaptación de impedancias, aunque apenas sea perceptible. Y a esto sumarle el que puedan aparecer burbujas de aire entre medio de los elementos si no se procede con cuidado. Por último, se ha dejado reposar unos 10 minutos para la buena solidificación.

## 3.2 MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

En cuanto a la utilización de recursos de laboratorio se contó con una amplia variedad de herramientas y materiales que son los siguientes:

- 1 transductor comercial Olympus 1 MHz (Fig. 3.4)
- 6 transductores fabricados en laboratorio: 2 sin capa adherida, 2 con capa de adaptación epoxi, y 2 con capa de adaptación impresa 3D (Fig. 3.1 y 3.2)
- Caja y soporte para la sujeción de los transductores (Fig. 3.3 y 3.4)
- Pulsar/Receptor Olympus 5072 y Red Pitaya (Fig. 3.5)
- Cableado necesario para interconexión de equipos y transductores
- Software Matlab
- Pie de rey digital Dexter, papel de lija y sargento (Fig. 3.6)
- Pegamento instantáneo de baja viscosidad Loctite 495

Para los transductores no comerciales, se dispone de una tapa especial con un orificio donde colocar el transductor a modo de rosca como fijación de manera adecuada en la caja y asegurar una alineación precisa. Aparte, se emplearon soportes específicos para mantener el transductor comercial en una posición estable durante las pruebas, esto debido a las dimensiones de esta que imposibilitaban su colocación de la otra manera.



**Figura 3.3** Tapa y recipiente con transductor colocado.



**Figura 3.4** Transductor comercial colocado en soporte.

Los instrumentos empleados en las pruebas incluyeron el Pulser/Receptor Olympus 5072, que permitió generar y recibir señales ultrasónicas de forma adecuada. Asimismo, se utilizó la Red Pitaya, una herramienta de control y medición, que se conectó al ordenador y se utilizó en conjunto con el software MATLAB para realizar las visualizaciones y el análisis de los datos obtenidos. De este modo se pudo realizar el trasvase de datos directamente al ordenador sin tener que pasarlos primero por un osciloscopio.



**Figura 3.5** Red Pitaya conectada al Pulser Olympus 5072.



**Figura 3.6** Pie de rey digital Dexter y lija usadas para las capas de adaptación 3D.

Para medir el grosor requerido de las capas de adaptación se utilizó un pie de rey digital Dexter. También se empleó lija para ajustar con precisión el grosor de una de las capas de adaptación de acuerdo con las especificaciones necesarias dado que no las cumplía inicialmente.

Por último, para el acoplamiento de las capas a los transductores carentes de ellas, se utilizó pegamento líquido Loctite 495 y un sargento para una presión uniforme en toda la superficie de adhesión.

### 3.3 CONFIGURACIÓN Y METODOLOGÍA DEL PROCESO DE MEDIDA

El objetivo principal es determinar el ancho de banda y la sensibilidad de los 7 transductores seleccionados. Para lograrlo, se sigue el método Medidas Pulso-Eco en inmersión en el agua [4] que se enfoca en el análisis del pulso reflejado sobre una superficie de alta impedancia cuando la señal viaja a través del agua.

Esto consiste en transmitir las señales ultrasónicas a través del transductor sumergido en agua y recibir las reflexiones que se generan al chocar con el fondo del recipiente. Con dicha información se es capaz de obtener la frecuencia fundamental de trabajo, el ancho de banda y la sensibilidad.

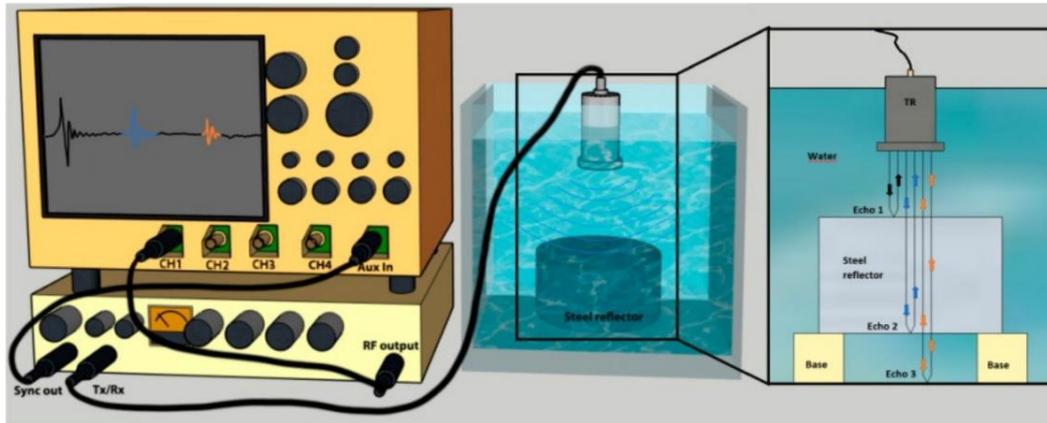


Figura 3.7 Montaje experimental para medidas pulso-eco. [4]

Para ello, el montaje se basa en el de la Figura 3.7, donde una vez se tenga el transductor colocado y alineado para obtener una señal clara y haberlo sumergido en el recipiente lleno de agua, se conecta al pulser/receptor Olympus 5072, encargado de emitir la señal de salida que excita el transductor.

En el caso del estudio se sustituye el osciloscopio por la red Pitaya que cumple el mismo propósito, de esta manera la visualización y manipulación de la información se puede realizar directamente en el Software Matlab.

Los parámetros de configuración utilizados en el pulser se pueden observar en la siguiente imagen, se adjunta tabla para mayor claridad:

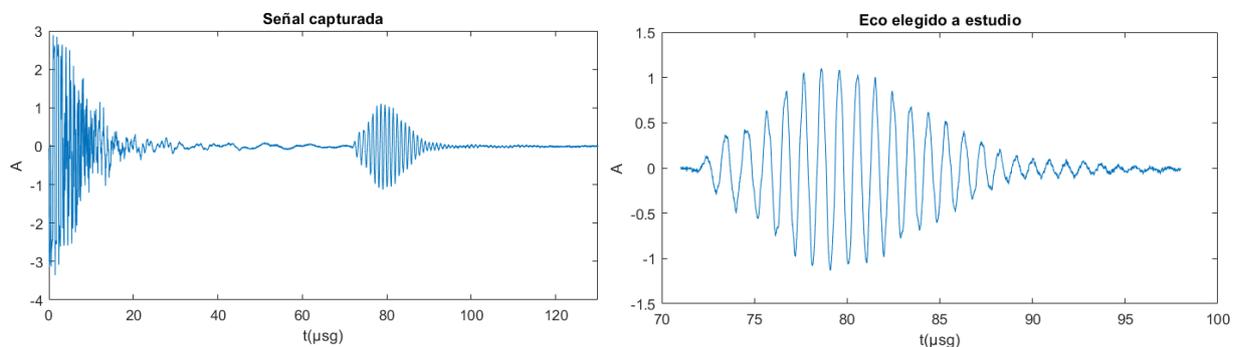


Figura 3.8 Parámetros de configuración del Pulser Olympus 5072.

<b>PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PULSER OLYMPUS 5702</b>
<b>PRF:</b> 200 Hz
<b>DAMPING:</b> Factor 4
<b>ENERGÍA:</b> Factor 4
<b>GANANCIA:</b> 0 dB
<b>FILTROS:</b> Se aplica el filtro pasabajo con frecuencia de corte a 10 MHz dado que los datos que resultan útiles están cercanos a 1 MHz.

**Tabla 3.3** Parámetros de configuración del pulser Olympus 5702

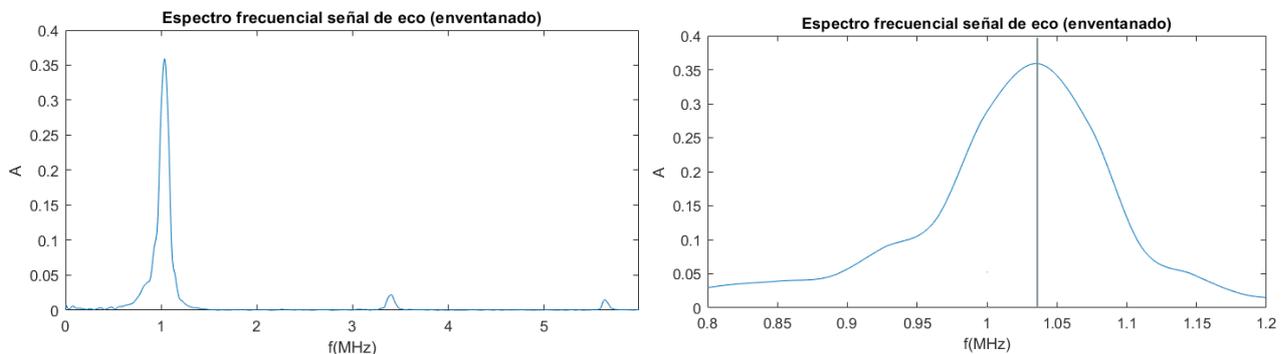
De esta manera se obtienen los datos recogidos por el transductor en las reflexiones, y se es capaz de visualizar las señales mediante el programa de Software Matlab y el código ofrecido por la Pitaya para estos fines. Este es un ejemplo de una señal capturada en el proceso:



**Figura 3.7** Señal recibida por el transductor M4 sin capa, capturada en Matlab.

Se aprecian claramente dos pulsos en la señal, el pulso inicial que corresponde con las componentes eléctricas generadas por el pulser en la cerámica piezoeléctrica, y acto seguido aparece el primer eco o reflexión de la onda generada al chocar con el recipiente en el cambio de impedancias, en el fondo.

La reflexión que se va a estudiar se aísla del resto de la señal y se le aplica la transformada de Fourier para obtener las componentes frecuenciales de la onda.



**Figura 3.8** Espectro frecuencial de eco seleccionado a estudio y su ancho de banda de trabajo.

Como se observa en la figura 3.8 la componente frecuencial más influyente se encuentra en torno a 1 MHz desplazado en unos 40 kHz, y un ancho de banda de alrededor de 102 kHz en este caso, obtenido visualizando el rango de frecuencias donde la amplitud de

la señal es mayor a la mitad del valor máximo de amplitud.

Una vez obtenidas las respuestas de los distintos transductores siguiendo el mismo proceso para cada uno de ellos, se puede proceder, a obtener la sensibilidad de cada transductor. En la obtención de la sensibilidad, es necesario saber antes el pulso emitido por el Olympus con el cual se excita el transductor.

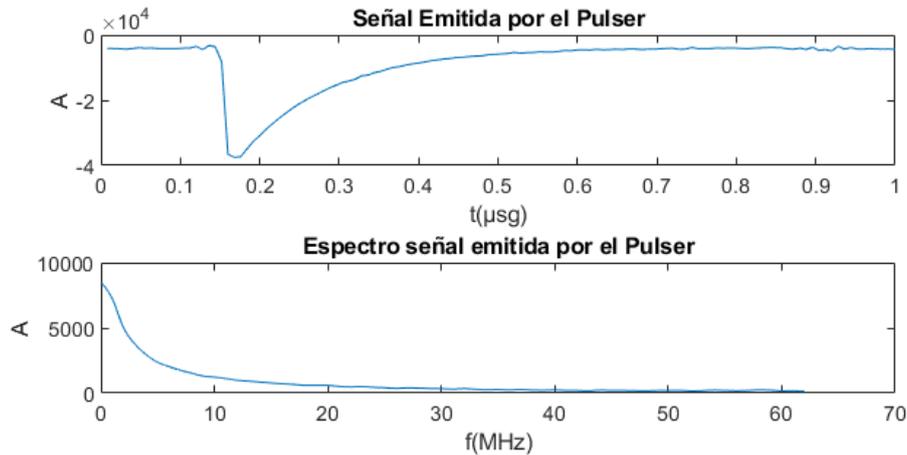


Figura 3.9 Señal emitida por el pulser junto a su espectro frecuencial.

Con dicha información, al aplicar la transformada de Fourier a esta nueva señal se puede obtener la sensibilidad del transductor sometido a estudio [4]:

$$S = 20 \log \frac{FFT(S_{Rx})}{FFT(S_{Tx})}$$

(8)

Siendo  $S_{Tx}$  la señal aplicada al transductor y  $S_{Rx}$  la señal eléctrica recibida del eco. En definitiva, para el ancho de banda de interés se tendría esta sensibilidad:

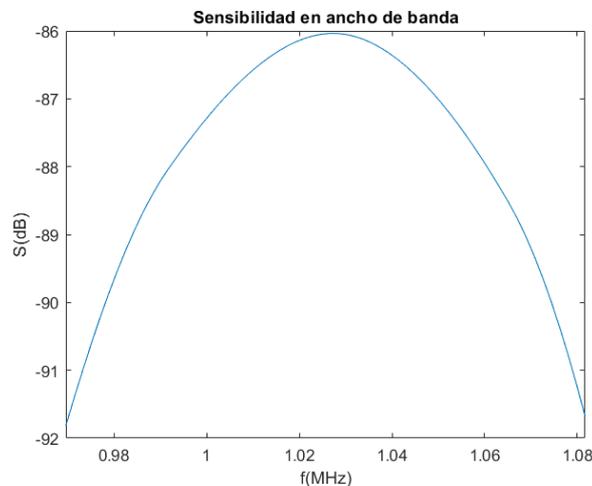


Figura 3.10 Sensibilidad obtenida del transductor M4 sin capa, a estudio.

Con este enfoque metodológico, se busca obtener los datos que nos permitan evaluar y comparar el rendimiento de los transductores en términos de su ancho de banda y sensibilidad para las siguientes muestras:

MUESTRAS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
TRANSDUCTOR	Sin capa de adaptación		Con Capa de adaptación 3D		Con Capa de adaptación EPOXI		Comercial V392

**Tabla 3.4** Muestras a estudio

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

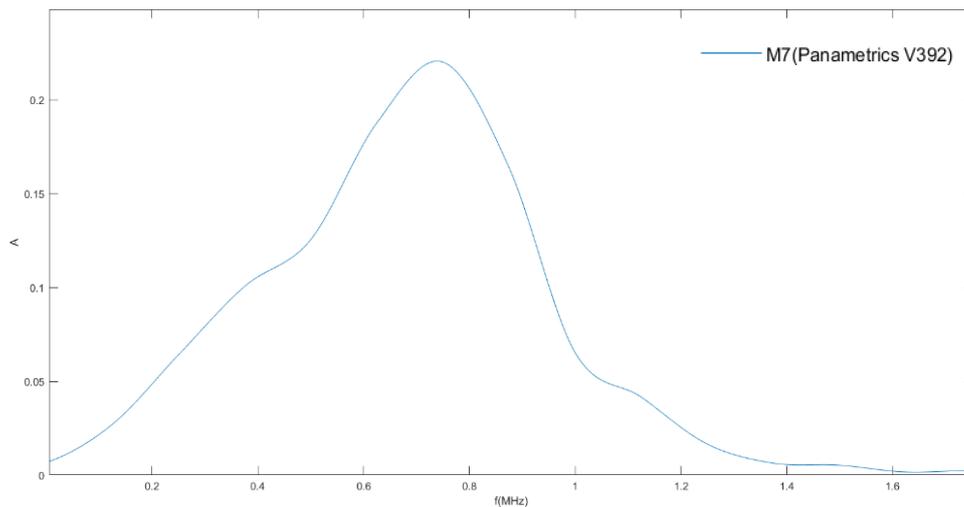
En este apartado, se estudiarán los datos recogidos a través de las mediciones realizadas de los distintos transductores piezoeléctricos. Por lo que se analizará el desempeño de cada transductor, desmenuzando las señales capturadas para obtener su ancho de banda y su sensibilidad. No solo se presentarán los datos, sino que también se profundizará en su análisis.

### 4.1 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda define el rango de frecuencias en el cual los transductores pueden operar de manera óptima. Esta característica no solo permite adaptar los transductores a los materiales y objetos bajo estudio, sino que también influye en la detección de defectos, la claridad de la imagen y la precisión de los resultados en pruebas no destructivas.

En consecuencia, resulta intuitivo pensar en que un ancho de banda mayor implica cubrir una mayor gama frecuencial, por lo que se concluirán como mejores los resultados donde se obtengan mayores anchos de banda.

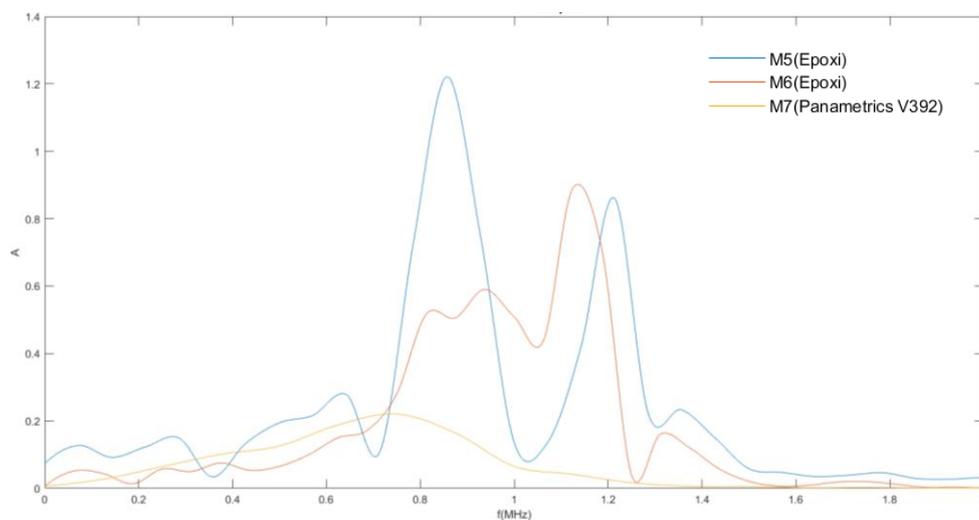
En relación con esto, se ha escogido el transductor comercial Panametrics V392, operante según sus especificaciones en torno a 1 MHz, aunque por los resultados obtenidos de la metodología llevada a cabo el pico frecuencial se encuentra en derredor de los 750 kHz con un ancho de banda aproximado de 550 kHz.



**Figura 4.1.1** Espectro frecuencial eventanado de transductor Panametrics V392.

En la figura anterior se puede apreciar la forma de campana de la señal resultante que se tomará como referencia con el resto de los transductores.

Primeramente, la Figura 4.1.2 muestra en conjunto, las respuestas de los dos transductores con capa de resina de epoxi y el V392:

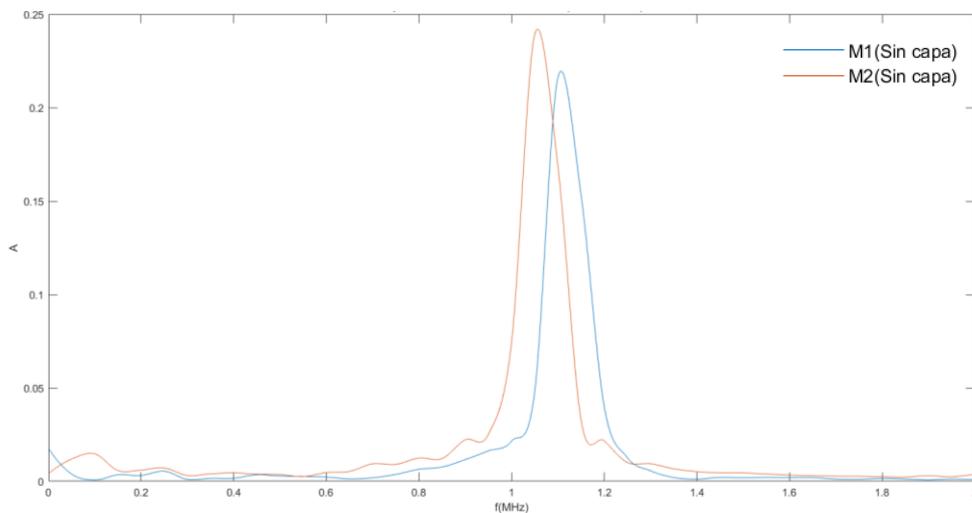


**Figura 4.1.2** Anchos de banda de los transductores epoxi junto al Panametrics V392.

Las frecuencias centrales se encuentran cercanas, con la Muestra 6 en torno a 415 kHz y la Muestra 5 a 470 KHz, no demasiado lejos del V392. En cambio, sí que difieren en la forma, siendo la Muestra 6 más uniforme en su aspecto, con una respuesta un tanto más lineal en comparación con la M5 donde dos picos sobresalen claramente. También existe cierta tendencia a la aparición de un segundo pico claro a la izquierda del pico máximo en la Muestra 6.

La explicación a la aparición de los 2 picos es debido a los modos de vibración en la capa de adaptación que atribuyen distintas frecuencias de resonancia, el causante de esto es el desajuste en la adhesión de las capas de adaptación [13] que produce dicho efecto.

Esta conclusión es derivada del estudio de la respuesta frecuencial de los 2 transductores desprovistos de capa de adaptación, cuya fabricación, montaje o estructura de los diferentes elementos que lo componen no difieren entre ellos:

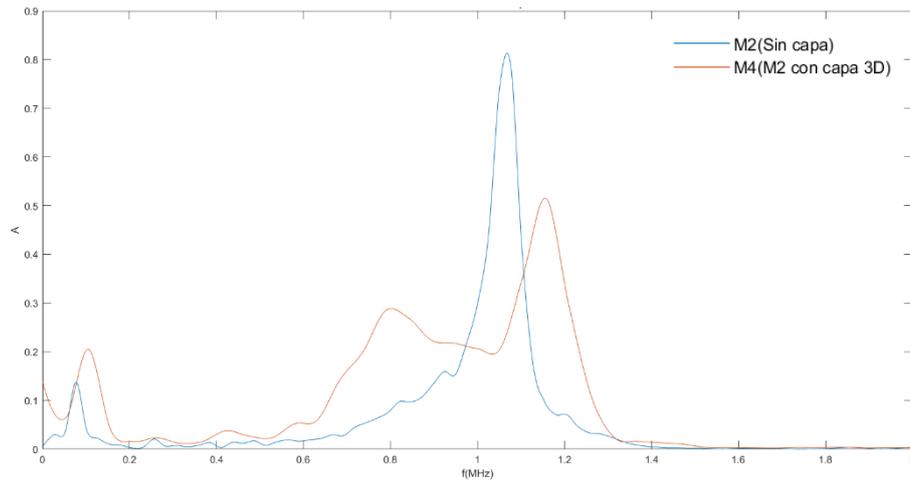


**Figura 4.1.3** Anchos de banda de transductores sin capa de adaptación.

Sin entrar a analizar las amplitudes de las 2 muestras (se realizaron con configuraciones del pulser diferentes), la frecuencia fundamental de vibración está clara en todos los casos, y no se aprecian perturbaciones en la señal próximos a la frecuencia fundamental.

Aparte de esto, ambos transductores se encuentran en una frecuencia de trabajo de entre 1 y 1.2 MHz, y con unos anchos de banda próximos a 97, y 102 kHz el mejor, la Muestra 2, que es al mismo tiempo es el que más cerca está de 1 MHz de la frecuencia fundamental.

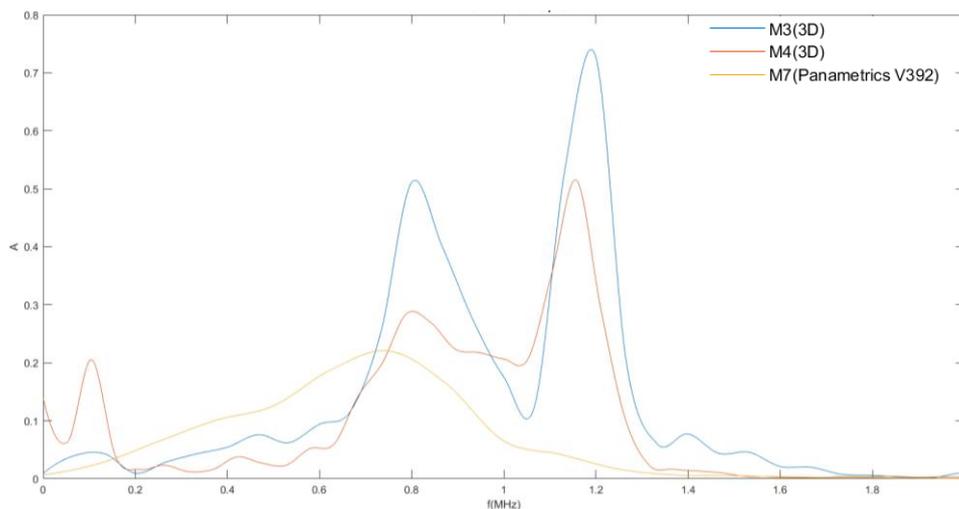
Son estos dos transductores las muestras a las que se les ha adherido más tarde la capa de adaptación impresa en 3D. Se puede constatar a continuación el efecto de la aplicación del *matching layer* a la Muestra 2.



**Figura 4.1.4** Anchos de banda de transductor M2 sin capa y una vez aplicada la capa 3D.

En el caso de la muestra 2, ha pasado de tener un ancho de banda de 102 kHz a uno de 447 kHz, lo cual es una mejora importante. También, hay que apuntar que la amplitud de la señal adquirida se ve reducida considerablemente a consecuencia de la capa extra adherida que induce a cierta atenuación, así como la capa de pegamento, que, aunque sea mínima, es algo a tener en cuenta.

En cuanto a la Muestra 1, a la que también se le ha adherido el impreso 3D, su ancho de banda se ve aumentado desde los 97 kHz hasta los 480 kHz con una eficacia mayor por tanto que en el anterior caso, por lo que también se encuentra cerca de los 550 kHz de ancho de banda del comercial. He aquí ambas señales compartiendo misma gráfica:



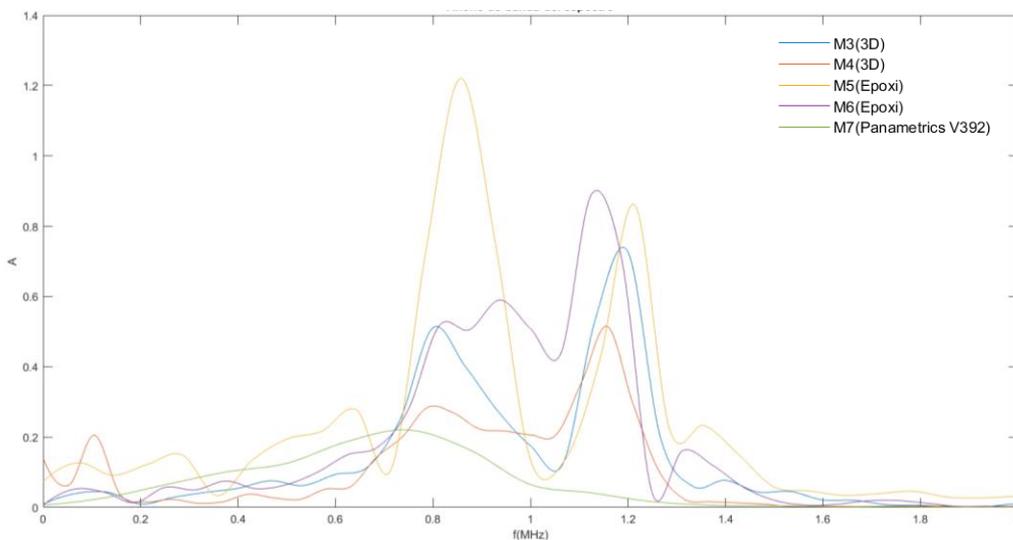
**Figura 4.1.5** Anchos de banda de transductores M3 y M4 junto al Panametrics V392.

Se detecta en la figura anterior, lo que ocurría en la Figura 4.1.2 de los transductores epoxi. Resonancias notorias, especialmente en la Muestra 3 debidas al deficiente pegado de

la capa, composición o geometría de la misma. De hecho, la Muestra 3 es la capa que ha sido lijada a mano porque no cumplía con el grosor adecuado, y ha resultado tener mayor margen de error.

Cualquier mínima imperfección puede llegar a variar la respuesta y crear resonancias, como en este caso. En general, todas las muestras a las que se les ha aplicado la capa de adaptación han mostrado esta tendencia a aparecer estas frecuencias resonantes.

Por último, se adjuntan a continuación para comparativa los cuatro transductores (Muestras 3, 4, 5 y 6) con capa de adaptación junto al Panametrics V392:



**Figura 4.1.6** Ancho de banda de los transductores con capa (M3, M4, M5, M6) junto al V392 (M7).

He aquí una tabla con todos los anchos de banda obtenidos a modo resumen:

SIN CAPA		CON CAPA 3D		CON CAPA EPOXI		PANAMETRICS V392
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
97 kHz	102 kHz	480 kHz	447 kHz	470 kHz	415 kHz	550 kHz
97 – 102 kHz		447 – 480 kHz		415 – 470 kHz		550 kHz

**Tabla 4.1** Anchos de banda aproximados de todos los transductores a estudio

Se obtienen unos resultados de ancho de banda muy parejos, una vez insertadas las capas 3D y las capas epoxi, las 3D incluso llegan a ser un poco mejores. Comparándolos con el transductor comercial se quedan relativamente cerca y se puede decir que tienen buena respuesta, hay que tener en cuenta que su fabricación ha sido más precisa, con lo que es normal.

Se han observado las imperfecciones de las muestras con capa no comerciales, y se

les ha dado explicación, los problemas de resonancia resultan ser muy acusados, y en los casos más extremos hacen perder un rango de frecuencias importante que impactan en el producto final.

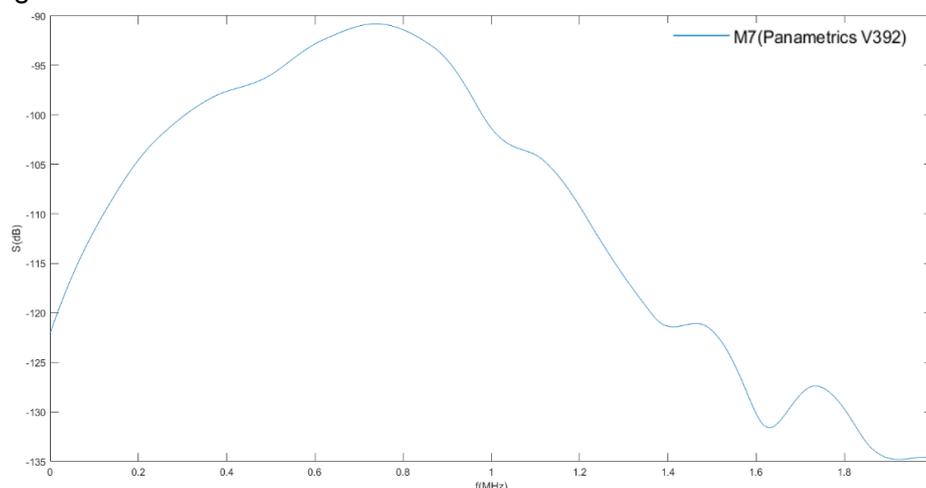
En lo relativo a las amplitudes de las señales obtenidas, se podría decir que los transductores 3D disponen de una menor amplitud general, y superan de forma holgada al transductor comercial, pero se entrará más en detalle en qué afectan las diferencias de amplitud en el siguiente apartado del estudio de sensibilidades.

## 4.2 SENSIBILIDAD

La sensibilidad de un transductor define la capacidad para detectar y responder a señales débiles, lo que en el contexto de las pruebas no destructivas (NDT) se traduce en su habilidad para identificar defectos o características internas en los objetos o materiales que se estudien.

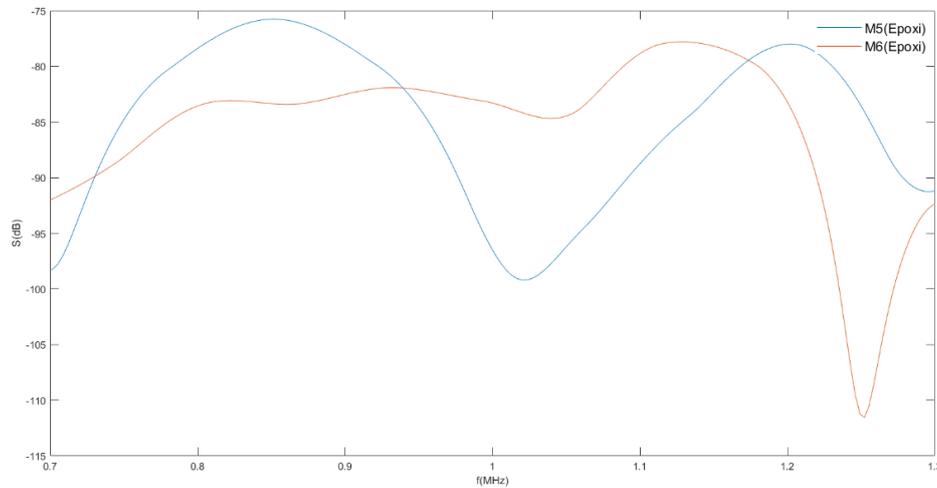
Este análisis proporciona información crítica sobre la capacidad de los transductores para detectar y medir variaciones sutiles en las señales reflejadas, contribuyendo directamente a la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos en aplicaciones NDT.

Tal como se ha procedido para el análisis de los anchos de banda, se tomará la sensibilidad del transductor comercial Panametrics V392 como referencia y comparación con el resto de los transductores una vez vistas todas las diferentes muestras. Como las frecuencias fundamentales se encuentra alrededor del MHz, las gráficas se visualizarán tomando ese valor como eje central, aunque se variará el rango de visualización para mayor claridad según el caso.



**Figura 4.2.1** Sensibilidad transductor Panametrics V392.

Se partirá nuevamente de la respuesta de los dos transductores con resina epoxi, ambos con un ancho de banda parecido, y cierta resonancia, siendo la Muestra 5 en la que más efecto surtía:



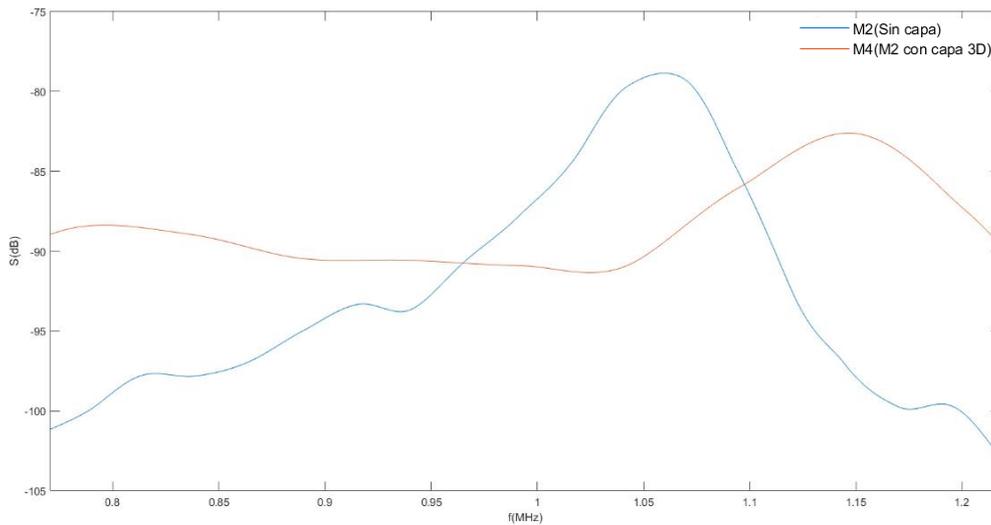
**Figura 4.2.2** Sensibilidad transductores epoxi M5 y M6.

Dicha resonancia se sigue pudiendo observar aquí, con un desnivel en el ancho de banda de hasta casi 25 dB para el caso de la Muestra 5, donde resulta que en la frecuencia fundamental posee de menor sensibilidad que en el resto del rango de frecuencias.

Asimismo, aunque el ancho de banda de la Muestra 6 sea ligeramente menor tiene una respuesta más plana en toda la gama frecuencial, aunque se siga apreciando esa misma tendencia de pérdida en frecuencias centrales, no es tan acusada en este caso.

Por lo tanto, se podría llegar a la conclusión de que en términos generales la Muestra epoxi 6 aporta resultados mejores en cuanto a sensibilidad se refiere y contrarresta el menor ancho de banda haciéndolo un transductor más eficiente y adecuado para NDT de entre los dos casos.

A continuación, se evaluará como se ha hecho anteriormente con los anchos de banda, el efecto causado por la aplicación de la capa de adaptación 3D al transductor de la Muestra 2, antes sin capa. Para ello se muestran superpuestas las dos situaciones en la siguiente gráfica:

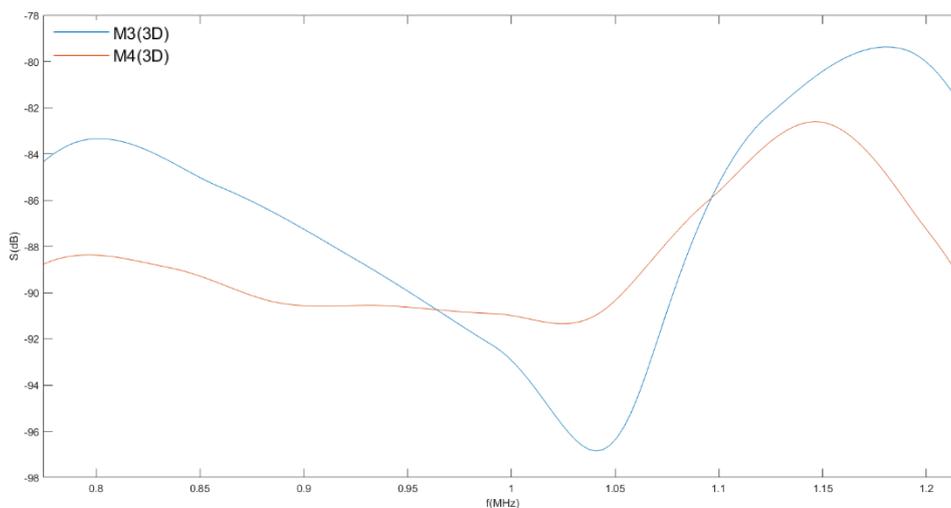


**Figura 4.2.3** Sensibilidad transductor M2 sin capa y una vez aplicada la capa 3D (M4).

Se captura justamente todo el ancho de banda, una vez adherida la capa, en la figura anterior. Los resultados son consecuentes a lo visto hasta ahora, el aumento en ancho de banda hace al transductor más sensible en todo el espectro pese a la atenuación respecto al transductor previo al pegado, en las frecuencias centrales.

Por otra parte, es un resultado comprensible, la atenuación añadida por la propia presencia de la capa hará la recepción de la señal menos sensible, a lo que nos lleva a ver cómo las amplitudes observadas en el apartado anterior influirán en una mejor o peor sensibilidad. Cuanto menor sea la amplitud de la señal emitida peor será la sensibilidad, y por consiguiente de peor calidad el transductor.

Se muestran seguidamente las sensibilidades de los dos transductores 3D:

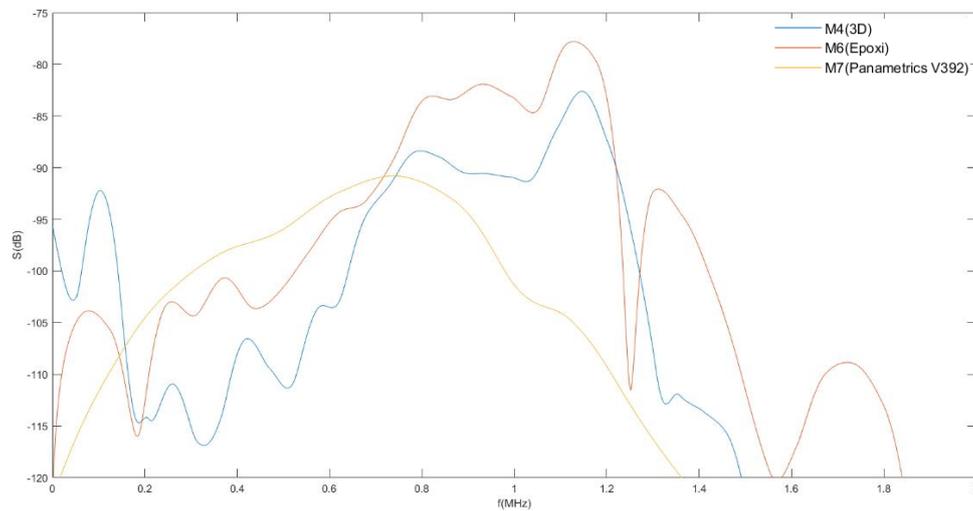


**Figura 4.2.4** Sensibilidad de transductores M3 y M4 con capa 3D.

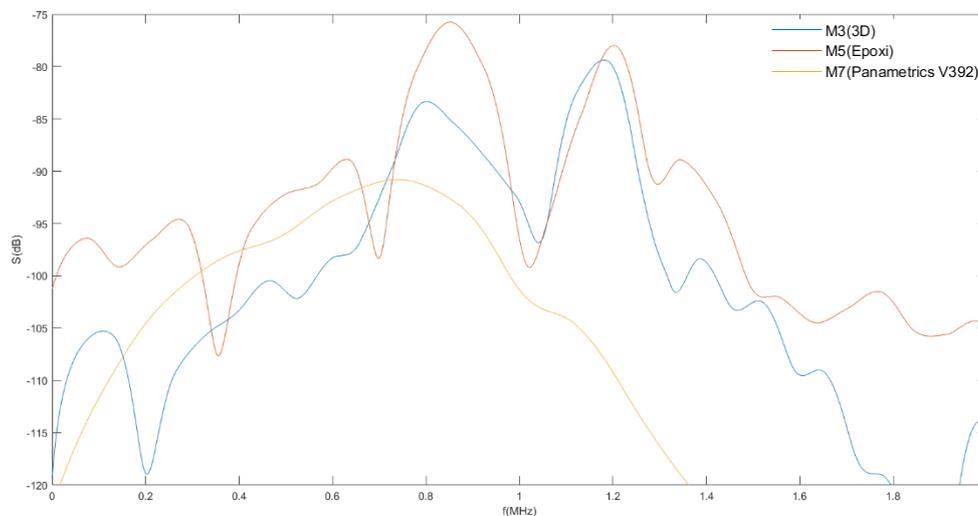
La similitud con las Muestras de epoxi de la figura 4.2.2 es clara, se nota también esa mayor resonancia de la Muestra 3 de la que se ha sometido al lijado por lo que las conclusiones son prácticamente las mismas.

En cualquier caso, es necesario comentar que la pérdida para frecuencias centrales resulta en mejor sensibilidad para frecuencias exteriores. Esto hace que en lo global, la Muestra 3 tenga una mayor sensibilidad a costo de una respuesta menos plana.

Por último, para mayor claridad, se comparten todas las sensibilidades de las Muestras adquiridas separadas en dos figuras. La primera con los dos transductores que mayor resonancia presentaban, y la segunda con los dos transductores con respuesta más plana, en ambos casos junto con la sensibilidad del transductor comercial V392, en el rango de frecuencias que va de 0 a 2 Mhz:



**Figura 4.2.5** Sensibilidad transductores M4 y M6, con capa 3D y capa epoxi respectivamente junto al V392.



**Figura 4.2.6** Sensibilidad transductores M3 y M5, con capa 3D y capa epoxi respectivamente junto al V392.

Se puede argumentar que la sensibilidad del transductor comercial es peor comparativamente con todos los demás transductores porque se encuentra prácticamente por debajo de las sensibilidades de las demás teniendo en cuenta el rango de frecuencias donde operan.

Dado que el V392 está desplazado en las gráficas (tiene una frecuencia fundamental en las mediciones de 750 kHz), sale en parte por encima del resto, pero no sería tan dramático en caso de que trabajará exactamente a 1 MHz. Por lo que se consideran mejores en este aspecto los resultados obtenidos de todos los transductores de laboratorio a estudio.

En cuanto a la comparación de las cuatro Muestras de capas 3D y epoxi, se aprecia una diferencia de entre 5 y 10 dB en detrimento de los transductores 3D para las dos figuras 4.2.5 y 4.2.6. Se puede intuir de forma muy visual ya que las características resultantes de las cuatro muestras dan como resultado el par de transductores con equivalencias claras entre sí en cuanto a la forma de la señal.

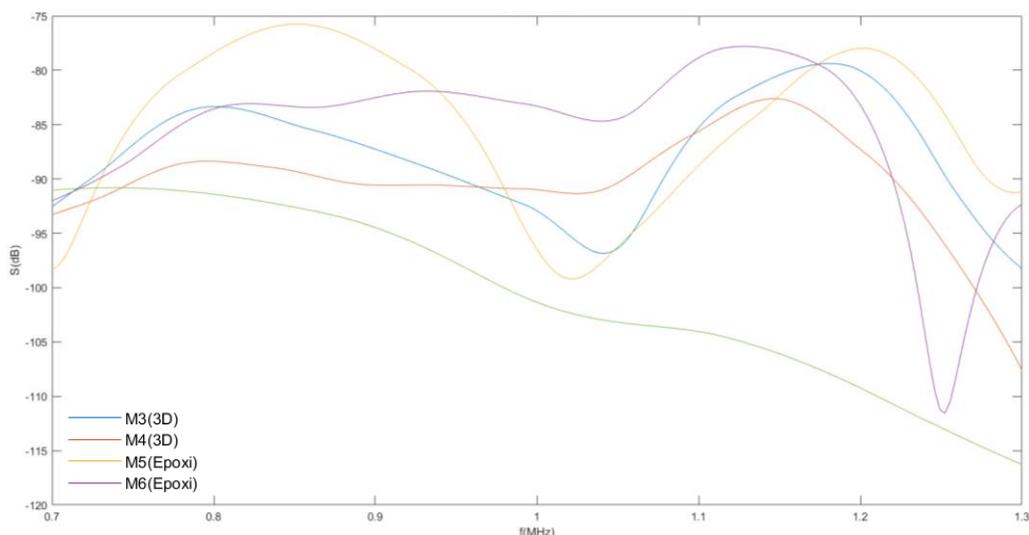


Figura 4.2.7 Sensibilidad transductores M3, M4, M5 y M6.

Por lo tanto, en lo que a la sensibilidad de todos los transductores bajo estudio respecta, se concluye que se supera con creces la respuesta del Panametrics V392, que es el que peor resultado da. No solo por la baja sensibilidad demostrada, sino por el desplazamiento en las frecuencias resaltadas que no se acercan a las de interés para un transductor que supuestamente opera a 1 MHz.

También, resulta lógico que la sensibilidad del Panametrics V392 sea más baja, puesto que es un transductor atenuado con *backing*, donde se prioriza el ancho de banda y se da mucha menos importancia a la sensibilidad, por ser precisamente un transductor

pensado para NDT.

Por otro lado, debido a mayores problemas detectados por resonancias en las Muestras 1 y 4, se puede afirmar que en general las Muestras 3 y 4 dan una mejor respuesta. Se ven afectadas en menor medida por las resonancias y la sensibilidad es más constante en todo el rango de frecuencias.

Con todo, decir que las Muestras peores pudieran ser de utilidad para aplicaciones en las que la resolución necesaria estuviera justamente en las frecuencias más resaltadas o sensibles, y no tanto donde la caída de sensibilidad es mayor.

También, apuntar que por lo general los transductores hechos con resina epoxi aportan una mejor sensibilidad, se encuentran 5-10 dB por encima de las de 3D en casi todo el ancho de banda, y es indiscutible su superioridad en este aspecto.

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis realizado para los 2 transductores sin capa, los 2 con capa de adaptación epoxi, los 2 transductores con capa 3D y el Panametrics V392 de los anchos de banda y sensibilidades ha revelado información útil sobre su rendimiento. Más en concreto para el caso de los transductores piezoeléctricos con capas 3D siendo el aspecto novedoso del estudio.

La elección del transductor comercial Panametrics V392 como referencia, aunque con un pico frecuencial en torno a los 750 kHz, ha valido como una comparación interesante. Los resultados obtenidos en las mediciones han sido contrastados con las muestras con capas de resina epoxi y capas de impresión 3D y se podría decir que son mejores en lo global. Es verdad que los transductores de laboratorio tienen un ancho de banda un poco menor, pero se ve contrastado por operar a frecuencias más cercanas a las de interés y poseer de una mayor sensibilidad.

Se ha observado una tendencia a la aparición de segundos picos en las respuestas de los transductores con capas adicionales, lo que podrían deberse a modos de vibración de las capas de adaptación o resonancias.

El porqué se puede hallar en las imprecisiones o problemas que han podido ocurrir en la fabricación de estas, dado que ha sido un proceso realizado a mano con lo que esto conlleva y no mediante un método automatizado que es capaz de aportar resultados más exactos.

En la aplicación de las capas 3D, por ejemplo, una de ellas ha tenido que ser lijada para obtener un grosor adecuado, y después, en el pegado de ambas capas han podido llegar a aparecer desperfectos como burbujas de aire creados en la junta. A todo esto, es necesario añadirle el problema que supone el tener esa capa extra de pegamento que en una situación ideal no debería estar, la desadaptación de impedancias es acumulativa y es importante intentar evitarla en la medida de lo posible.

En cuanto a los resultados obtenidos, los transductores sin capas de adaptación mostraron frecuencias fundamentales claras, con anchos de banda cercanos a 100 kHz. La incorporación de capas de adaptación ya sea de resina epoxi o de impresión 3D, generan un impacto significativo, lo esperable por otra parte, en los anchos de banda y en las resonancias detectadas.

Se observó que la aplicación de capas 3D aumentó considerablemente el ancho de banda hasta los 447-480 kHz, valores ligeramente más altos incluso que para los transductores de capa epoxi, mejorando así la capacidad del transductor para abarcar una amplia gama de frecuencias, y quedándose cerca de los 550 Hz del V392.

En términos de sensibilidad, se ha identificado que los transductores 3D superan notablemente al transductor comercial V392, lo que sugiere que podrían ser más eficientes en la detección de señales débiles y en la identificación en pruebas no destructivas de defectos internos. En el caso de las muestras con capas de resina epoxi presentaron una sensibilidad mayor de en torno a 5-10 dB respecto a las capas 3D.

Las resonancias aparecidas también se hacen notar en las sensibilidades con pérdidas importantes en las frecuencias centrales, y es donde se ve la implicación de las amplitudes recogidas en el receptor y la importancia de una buena señal de emisión.

En conclusión, estos resultados indican que la elección y fabricación de las capas de adaptación impactan significativamente en los anchos de banda y la sensibilidad de los transductores. Mientras las capas 3D mostraron mejoras en el ancho de banda, las capas de resina epoxi presentaron una mejor sensibilidad.

## 5.2 CONCLUSIONES AL ESTUDIO

En el transcurso del trabajo, se han visto con detalle los efectos de incorporar capas de adaptación en transductores piezoeléctricos con el objetivo de mejorar sus capacidades de operación. Los resultados obtenidos proporcionan una visión clara de cómo estas capas influyen en el rendimiento de los transductores en términos de ancho de banda y sensibilidad.

En cuanto al ancho de banda, los transductores con capas de adaptación 3D han demostrado ser buenos para un amplio rango de frecuencias. Resultados prometedores, ya que no solo equivalen en ancho de banda a los traductores con resina epoxi, sino que los llega a mejorar.

Sin embargo, en cuanto a la sensibilidad, las capas de adaptación en 3D presentan una ligera disminución en la sensibilidad en comparación con las capas de epoxi. Decremento que puede atribuirse a la mayor atenuación causada por un mayor grosor de las capas 3D.

Esta atenuación influye en la capacidad del transductor para detectar señales débiles, lo que puede afectar la identificación de defectos o características internas en los objetos examinados en pruebas NDT.

A pesar de esta ligera pérdida en términos de sensibilidad, es importante considerar la aplicación a la que se dará uso, ya que, aunque la sensibilidad es un factor importante en aplicaciones de pruebas no destructivas, en otras en cambio puede no ser el factor dominante.

En casos donde la sensibilidad no es lo primordial, los transductores con capas de adaptación en 3D ofrecerían mayores ventajas dado que la facilidad y menor costo en la fabricación de estas, junto con su alta reproducibilidad, aportan un gran valor añadido, beneficioso en aplicaciones donde la sensibilidad del transductor no resulta ser tan fundamental.

En este sentido, los resultados de este estudio se consideran prometedores. Han demostrado que los transductores con capas de adaptación 3D tienen el potencial de ser una opción viable en la industria. Además, se ha logrado cumplir con los objetivos establecidos al inicio, proporcionando un análisis de cómo diferentes capas de adaptación afectan en el rendimiento de los transductores.

Mirando hacia el futuro, se podría decir que estos resultados sugieren el seguir en la investigación y desarrollo de capas impresas en 3D y su uso en los transductores piezoeléctricos. Buscar alternativas con las que equilibrar aún más su sensibilidad para una respuesta plana y encontrar soluciones más específicas al pegado efectivo de estas.

En conclusión, el evaluar en más profundidad su desempeño, y seguir esta línea de investigación, podría llevar a avances en los productos ofrecidos en el mercado, por la reducción de tiempos y coste se refiere.

Por lo que este estudio da como resultado un buen punto de partida para líneas futuras de investigación. Como continuación al estudio, sería interesante enfocarse en transductores con capa 3D con la adición de *backing*, de este modo se obtendría una comparación más fiel a transductores NDT comerciales.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rubio, C., & Marrero, O. (2010). Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías. *e-Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 15(9).
- [2] Szabo, Thomas. (2004). *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*. Elsevier Science. <https://www.perlego.com/book/1836527/diagnostic-ultrasound-imaging-inside-out-pdf>.
- [3] Kinsler, L.E., & Coppens, A.B., & Frey, A.R., & Sanders, J.V. (2000). *Fundamentals of Acoustics*, 4. Edición.
- [4] Quirce Aguilar, J. (2022). *Mechanical and Electromechanical Study of Ferro-Electrets Films for Water Immersion Ultrasonic Transducers*. Tesis doctoral.
- [5] Gallego-Juarez, J. A. (1989). Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 22 804.
- [6] Postema, M. (2011). *Fundamentals of Medical Ultrasonics*, Spon press, 2011, 1. Edición.
- [7] Gutiérrez, F. (2010). *Principios de Piezoelectricidad*, ISSN 1988-6047. Artículo académico
- [8] Shung, K. K. & Zippuro, M. (1996) *Ultrasonic transducers and arrays*. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 15, no. 6, pp. 20-30, DOI: 10.1109/51.544509.
- [9] Seon Mi Ji, Jin Ho Sung, Chan Yuk Park, Jong Seob Jeong. (2017) *Phase-canceled backing structure for lightweight ultrasonic transducer*. Elsevier Science. Volume 260, Pags. 161-168.
- [10] Rathod, V. T. (2020) *A Review of Acoustic Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors and Transducers*. MDPI. Artículo.
- [11] Ding, W. & Bavencoffe, M. & Lethiecq M. (2021) *Modeling and Experimental Characterization of Bonding Delaminations in Single-Element Ultrasonic Transducer*. MDPI. Artículo.
- [12] Willcox, M. & Downes, G. (2000) *A brief description of NDT Techiques*. Artículo.
- [13] De Jong, N. & Souquet, J. & Faber, G. & Bom, N. (1985) *Vibration modes, matching layers and grating lobes*. Elsevier Science. Volume 23, Issue 4.

**PÁGINAS WEB:**

[14] Ingeniería básica: <https://ingenieriabasica.es/efecto-piezoelectrico/>

[15] Semantic Scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Ultrasonic-NDT/>

[16] Publisher of Open Access Journals: <https://www.mdpi.com/>

[17] Olympus, Soluciones industriales: <https://www.olympus-ims.com>

[18] PI Ceramic: <https://www.piceramic.com>

## 7 ANEXO

### 7.1 CÓDIGO MATLAB UTILIZADO

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ANCHO DE BANDA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Vuelco datos, fs y creación eje temporal

% Comercial1M SinCapa0 SinCapa 3D0 3DNuevo Epoxi1 Epoxi4
load 3D0 %Cargar señal a estudiar signal_num_2

% load t1_3D0 %Enventanado eco límite inferior
% load t2_3D0 %Enventanado eco límite superior
% load r_3D0 %Ajuste ejes

N=length(signal_num_2);
dt=1/Fs;
t=0:dt:(N-1)*dt;

%Plot señal original
figure(1)
subplot(2,2,1)
plot(t*1e6,signal_num_2) %t(us)
title("Señal capturada")
xlabel("t (μsg)")
ylabel("A")
xlim([0, 130]);

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SELECCIÓN ECO
%%

t1 = 0.75e-4; %Límite inferior
t2 = 0.95e-4; %Límite superior
indt1=find(t>t1,1,'first');
indt2=find(t>t2,1,'first');

t0=t(indt1:indt2); %intervalo seleccionado [t0=t(1:indt1);]
M2=signal_num_2(indt1:indt2); %Valores del intervalo seleccionado %
[M2=M(1:indt1);]

%Plot eco
subplot(2,2,2)
plot(t0*1e6,M2) % t(us)
title("Eco elegido a estudio")
xlabel("t (μsg)")
ylabel("A")
```

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%FFT señal eco, creación eje frecuencias, interpolación de
señal
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

FFTM=fft(M2);
L=length(FFTM);
P2 = abs(FFTM/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;

fi= 0:(f(2)/20):f(end);
N1=length(fi);
P1i=interp1(f,abs(P1),fi,'cubic');

%Plot FFT
subplot(2,2,3)
%figure(5)
plot(fi*1e-6,P1i) %f(MHz)
title("Espectro frecuencial señal de eco (enventanado)")
xlabel("f(MHz)")
ylabel("A")
xlim([0, 2]); %enventanado

%Plot FFT ancho de banda y valor BW
subplot(2,2,4)
plot(fi*1e-6,P1i)
title("Ancho de banda del espectro")
xlabel("f(MHz)")
ylabel("A")
a=find(P1i>max(P1i)/2,1,'first');
b=find(P1i>max(P1i)/2,1,'last');
xlim([fi(a)*1e-6, fi(b)*1e-6])
BW=fi(b)-fi(a)
fi(a)
fi(b)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SENSIBILIDAD
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Volcar datos pulso
load pulso %Cargar señal a estudiar signal_num_2 de la emisión

N=length(signal_num_2);
signal_num_2=100*signal_num_2; %Multiplicado por 100 debido a la
sonda x100 usada
dt=1/Fs;
t=0:dt:(N-1)*dt;

%Señal enventanada
t11 = 0;
t22 = 0.01e-4;
indt1=find(t>t11,1,'first');
indt2=find(t>t22,1,'first');
M2=signal_num_2(indt1:indt2);
t0=t(indt1:indt2);

%Plot señal emitida enventanada
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(t0*1e6,M2)
title("Señal Emitida por el Pulser (enventanado)")
xlabel("t (μsg) ")
ylabel("A")

%%
%%FFT señal, creación eje frecuencias, e interpolación
%%

FFTEmi=fft(M2);
L=length(FFTEmi);
P2emi = abs(FFTEmi/L);
P1emi = P2emi(1:L/2+1);
P1emi(2:end-1) = 2*P1emi(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;
N2=length(f);
fi= 0:(f(2)/r):f(end); %ajuste eje frecuencias respecto a señal
anterior
P1emi=interp1(f,abs(P1emi),fi,'cubic');

%Plot FFT pulser
subplot(3,1,2)
plot(fi*1e-6,P1emi)
title("Espectro señal emitida por el Pulser")
xlabel("f (MHz) ")
ylabel("A")

%Plot FFT eco

```

---

```
subplot(3,1,3)
plot(fi*1e-6,Pli)
title("Espectro eco elegido")
xlabel("f (MHz) ")
ylabel("A")
xlim([0,10])

%%
%%%%%%%%%%SENSIBILIDAD
%%

S=20*log10((Pli)./Pliemi);
figure(3)
plot(fi*1e-6,S)
title("Sensibilidad en ancho de banda")
xlabel("f (MHz) ")
xlim([fi(a)*1e-6, fi(b)*1e-6])
%xlim([0, 2])
ylabel("S (dB) ")
hold on
%
```