

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Caracterización de sensores piezoeléctricos
y capas de adaptación (matching layer)
para detectores de partículas tipo PICO”**

TESIS DE MASTER

Autor:

Jordi Ferrer i Ferrer

Director/es:

D. Joan A. Martínez Mora

D Iván Felis Enguix

GANDIA, 2015

Resumen.-

Uno de los problemas presentes en la detección acústica de partículas mediante cámaras de burbujas (en la colaboración PICO [7]) es la mejora de la sensibilidad de los sensores piezoeléctricos que se encuentran pegados a la vasija del detector. En este trabajo se pretende optimizar la mejora de sensibilidad de estos sensores mediante la incorporación de capas de adaptación (*matching layers, ML*) entre el cristal de la vasija y la cerámica. Con este objetivo se ha realizado inicialmente un estudio teórico de la transmisión a través de un número dado de capas y, posteriormente, se han validado dichos resultados con medidas experimentales mediante diferentes cerámicas y capas de adaptación. Los resultados obtenidos muestran una mejora de la sensibilidad en recepción en el rango frecuencial deseado.

Palabras Clave: Detección acústica; Capas de adaptación acústica; Transductores piezoeléctricos; Calibración acústica.

Abstract.-

One of the problems present in the acoustic detection of particles by bubble chambers (in the PICO collaboration [7]) is to improve the sensitivity of piezoelectric sensors are glued to the detector vessel. This paper is intended to optimize the improved sensitivity of these sensors by incorporating matching layers, ML, between the glass and ceramic vase. With this objective has initially made a theoretical study of the transmission through a given layer and then those results are validated with experimental measurements using different ceramics and adaptation layers number. The results show an improvement in receiver sensitivity at the desired frequency range.

Keywords: Acoustic detection; Acoustic matching layers; Piezoelectric transducers; Acoustic Calibration.

Índice

I. Objetivos	5
II. Diseño	6
II.1 Introducción.....	6
II.2 Cerámicas piezoeléctricas.....	8
II.2.1 Transmisión a través de una interfase (sin matching layer).....	9
II.3 Capas de adaptación (matching layers)	10
II.3.1 Transmisión a través de una capa (1 matching layer).....	11
II.3.2 Transmisión a través de n-capas (n matching layers)	13
III. Construcción	14
III.1 Configuraciones realizadas.....	14
III.1.1 Configuración 1: cerámicas sueltas.....	15
III.1.2 Configuración 2: cerámicas sueltas con matching layers	16
III.1.3 Configuración 3: cerámicas con matching layer pegadas a la vasija.....	17
III.2 Elección del matching layer adecuado	18
III.2.1 Frecuencias y ancho de banda a potenciar	18
III.2.2 Elección del material óptimo para el ML	19
III.2.3 Cálculo de los espesores del ML.....	20
IV. Caracterización	21
IV.1 Caracterización de materiales individuales	21
IV.1.1 Obtención de las velocidades del sonido	21
IV.1.2 Obtención de las densidades	23
IV.1.3 Obtención de las impedancias acústicas características.....	23
IV.2 Caracterización de transductores	24
IV.2.1 Obtención de la impedancia eléctrica.....	24
IV.2.2 Sensibilidad (RVR).....	26
IV.3 Pretratamiento de los datos.....	29
IV.3.1 Ondas electromagnéticas (OEM).....	29
IV.3.2 Ruido fondo	29
IV.3.3 Reflexiones producidas	30
IV.3.4 Precisión en la separación emisor-receptor	31
IV.4 Análisis de datos.....	32
IV.4.1 Filtrado de la señal	32
IV.4.2 Protocolo de análisis.....	33

V. Resultados	35
V.1 Resumen de las configuraciones realizadas.....	35
V.2 Ejemplo de una ficha de calibración.....	36
V.3 Impedancia eléctrica de las distintas configuraciones.....	37
V.3.1 Tipología Cilindros $\phi 10$	37
Configuración 2: Piezo + ML.....	37
Configuración 3: Piezo + ML + pyrex.....	37
V.3.2 Tipología Discos $\phi 25$	38
Configuración 2: Piezo + ML.....	38
Configuración 3: Piezo + ML + pyrex.....	38
V.4 Sensibilidad de las distintas configuraciones.....	39
V.4.1 Tipología Cilindros $\phi 10$	39
Configuración 2: Piezo + ML.....	39
Configuración 3: Piezo + ML + pyrex.....	39
V.4.2 Tipología Discos $\phi 25$	40
Configuración 2: Piezo + ML.....	40
Configuración 3: Piezo + ML + pyrex.....	40
V.5 Validación del modelo multicapa.....	41
V.5.1 Modelo de una capa.....	41
V.5.2 Modelo de dos capas.....	42
VI. Conclusiones	44
VII. Bibliografía	46
Anexo I. Fichas de calibración	48
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 7,7) “C1”.....	48
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 8,9mm) “C2”.....	49
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 16,1mm) “C3”.....	50
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 21,5) “C4”.....	51
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 23,8mm) “C5”.....	52
Transductor PIC255 ($\phi 10\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 31,1mm) “C6”.....	53
Transductor PIC255 ($\phi 25\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 15mm) “D1”.....	54
Transductor PIC255 ($\phi 25\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 20mm) “D2”.....	55
Transductor PIC255 ($\phi 25\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 25mm) “D3”.....	56
Transductor PIC255 ($\phi 25\text{mm}/\text{esp}5\text{mm}$) + ML (Al 30mm) “D4”.....	57
Anexo II: Relación de medidas realizadas	58
Anexos III: Scripts	61
Anexo IV: Características materiales utilizados	63
Anexo V: Características instrumentación	66

I. Objetivos

Esta Tesina de Fin Máster forma parte del trabajo que se está llevando a cabo en el Departamento de Física Aplicada en la Escuela Politécnica Superior de Gandía (UPV) para la mejora en la recepción de señales acústica en altas frecuencias y de baja amplitud.

El objetivo de este trabajo es desarrollar unas capas de adaptación, Matching Layers, ML, que sean capaces de aumentar la sensibilidad de los transductores piezoeléctricos en un determinado rango de frecuencias. Con este fin se han realizado diferentes configuraciones de medida para dos tipos de transductor piezoeléctricos de forma que se pueda apreciar cómo varía la sensibilidad de estos en función de la configuración de capas interpuestas entre la vasija y el piezoeléctrico (variando longitudes del ML, formas, materiales, etc.). También se comparan los resultados experimentales con diferentes modelos teóricos, partiendo de un modelo sencillo de una única capa de adaptación, ampliándolo a un número cualquiera de ellas.

Con ello, se pretende contribuir en el desarrollo del sistema de detección de materia oscura mediante las interacciones burbujas producidas por éstas (PICO-250L [7]).

En el Capítulo II se presenta brevemente cada una de las partes que tenemos que tener en cuenta en el diseño de un transductor piezoeléctrico, haciendo hincapié en los modelos teóricos de transmisión acústica a través de distintas capas. En el Capítulo III se exponen los montajes experimentales o configuraciones que se han realizado de las cerámicas sueltas, con un matching layer de aluminio y pegadas a una vasija de cristal pyrex para, posteriormente, en el Capítulo IV caracterizar cada uno de los materiales sólidos (obtención de la impedancia acústica característica) así como explicar el proceso de calibración de los transductores en cada una de las configuraciones (impedancia eléctrica y sensibilidad). Por último, en el Capítulo V se muestran los resultados obtenidos de dichas caracterizaciones, así como la validación de los modelos teóricos mostrados anteriormente.

II. Diseño

II.1 Introducción

Un transductor es un dispositivo capaz de convertir un tipo de energía en otro distinto. Los transductores piezoeléctricos son aquellos que basan su funcionamiento en el fenómeno de la piezoelectricidad. Este tipo de transductor genera una tensión eléctrica proporcional a la aceleración por presión sobre un cristal piezoeléctrico. Son capaces de recibir desde muy bajas frecuencias hasta ultrasonidos.

El grupo de investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas de la UPV, que colabora con el detector PICO en la caracterización y optimización de sensores piezoeléctricos que capten la señal acústica generada por el crecimiento de burbujas en un líquido sobrecalentado, las cuales se generan por la interacción de partículas con los núcleos de dicho fluido. En la Figura 1 se muestra una fotografía de la versión de 30 litros del detector PICO y que utiliza como fluido sobrecalentado el fluoruro carbono C_3F_8 cuando se han generado burbujas en su interior, así como la ubicación de los sensores piezoeléctricos pegados a las paredes de la vasija.

Esta vía de detección de partículas se emplea para la detección de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMP), candidatos a materia oscura no bariónica.

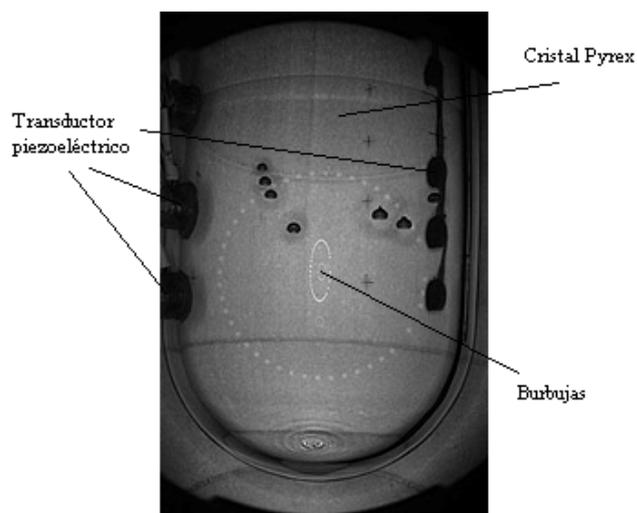


Fig. 1. Fotografía del detector PICO-60L en uno de los eventos detectados.

La señal acústica que se genera en el crecimiento de una burbuja en un fluido sobrecalentado ha sido estudiada teórica y experimentalmente, obteniendo una señal cuyo ancho de banda oscila desde muy baja frecuencia (\sim Hz) hasta el orden de los 100 kHz

El diseño general de transductores piezoeléctricos receptores consta de una serie de pasos que van desde la elección de la cerámica adecuada para las necesidades concretas hasta la optimización de los tipos y dimensiones de capas de adaptación de impedancias (matching layers) entre el medio desde el que se recibe hasta el propio piezoeléctrico, así como el añadir una masa posterior (baking) para ampliar el ancho de banda.

No obstante, una característica con especial incidencia en el desarrollo de sensores para PICO es que el medio de interés se encuentra en el interior de una vasija en cuya parte externa de sus paredes se sitúan pegados los detectores. Entonces, una vez establecido el tipo de cerámica más adecuada, tenemos que optimizar la transmisión acústica entre el fluido sobrecalentado y la propia cerámica, con la restricción de que ya se dispone de un medio intermedio (la pared de la vasija) cuyas propiedades no podemos modificar.

Entonces, los únicos parámetros que pueden variar para la conseguir la optimización de la señal que llega al transductor son las dimensiones y propiedades físicas del medio situado entre las paredes de la vasija y la cerámica piezoeléctrica, pero teniendo en cuenta que la señal acústica proviene de un medio ubicado junto a dicha pared (Figura 2). Para ello, se implementa un modelo de transmisión multicapa que permitirá predecir el coeficiente de transmisión acústica desde el fluido donde se generan las ondas acústicas hasta la cerámica piezoeléctrica para cualquier combinación de capas intermedias entre ambos. Dicho modelo será testeado y validado mediante diferentes configuraciones de capas intermedias, desde una única capa de diferentes espesores hasta dos capas incluyendo la del cristal. Con ello, se podrá estar en disposición de escoger la configuración que optimice la recepción en el rango de frecuencias deseado.

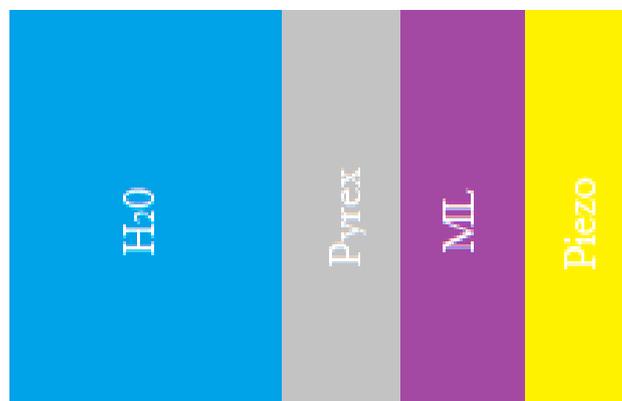


Fig. 2. Configuración del sistema de caracterización empleado en el laboratorio del DFA

II.2 Cerámicas piezoeléctricas

Gran parte de los progresos realizados en los ultrasonidos se debe a la sinergia proporcionada por los nuevos materiales de alto rendimiento y la mejora de la electrónica. Un paso importante en este sentido se dio en la década de 1940 con el desarrollo de transductores cerámicos polarizados de la familia zirconato de plomo (PZT), que son relativamente baratos, robustos, de alto rendimiento, y se adapta perfectamente al trabajo de campo. Se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Cerámicas blandas: tienen una alta movilidad y un comportamiento ferroeléctrico resultante blando, lo que significa una relativa facilidad para su polarización. La ventaja de los materiales piezoeléctricos blandos es su gran coeficiente piezoeléctrico de carga dominado por pequeños y grandes factores de acoplamiento. Este tipo de cerámicas son muy empleadas en aplicaciones de micro y nano posicionamiento, sensores de vibración, transmisores y receptores ultrasónicos de flujo, medidores de nivel, etc.
- Cerámicas duras: éstas pueden ser sujetas a grandes fuerzas eléctricas y mecánicas. Presentan una moderada permisividad, su gran factor de acople piezoeléctrico, factores de calidad altos, bajas pérdidas eléctricas, facilidad de uso continuo en modo de resonancia con muy bajo calentamiento del componente. Son muy utilizadas en las aplicaciones de limpieza, mecanizado de materiales, soldadura por ultrasonido, cavitación ultrasónica entre otras.

Para el desarrollo de este proyecto se han empleado cerámicas piezoeléctricas blandas tipo PIC 255 y PIC 155, de la compañía PICeramics, basadas en una modificación del PZT. Los estudios iniciales se realizaron con los cuatro modelos que se muestran en la Figura 3, pero los estudios más amplios con capas de adaptación se han utilizado únicamente el disco PIC255 Ø25mm h2mm y los cilindros PIC255 Ø10mm h5mm.



Fig. 3. Cerámicas utilizadas

La elección de estas cerámicas radica en que son semejantes a las ya utilizadas en los detectores COUPP4 y COUPP60, predecesores a la familia de detectores de PICO pues tienen un reducido tamaño para poder embeberlas en un encapsulado y, como se verá en la caracterización, presentan elevadas sensibilidades en frecuencias entre 50 kHz y 150 kHz, variable según la cerámica.

II.2.1 Transmisión a través de una interfase (sin matching layer)

Dado que en este trabajo se quiere estudiar la transmisión de ondas acústicas desde un medio en el que se general ondas sonoras hasta la cerámica donde se registra la señal eléctrica resultante, el primer paso consistirá en predecir la pérdida inherente que se produce al tener el sensor en el propio medio. Éste caso tiene una implementación sencilla dado que es semejante al estudio de transmisión de una onda acústica se transmite entre dos medios semi-infinitos cuya interfase es recta y perpendicular a la onda incidente, tal como se muestra en la Figura 4.

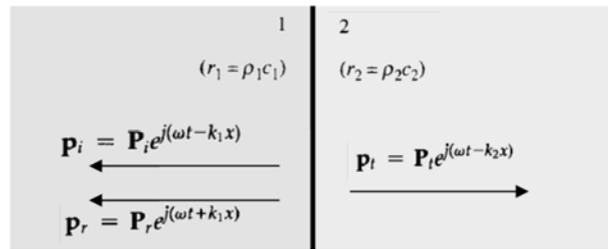


Fig. 4. Esquema para explicar el modelo de transmisión a través de una interfase

La solución a este problema está ampliamente recogida en la bibliografía [1]. En ella, a partir de las condiciones de continuidad de presión entra la onda incidente (i) reflejada (r) y transmitida (t), $p_i + p_r = p_t$ y de velocidad de partícula $\vec{u}_i + \vec{u}_r = \vec{u}_t$ en la interfase, se obtiene el coeficiente de transmisión de intensidad acústica $T_I = \frac{Z_1}{Z_2} |T|^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2$ que, según la nomenclatura utilizada aquí, resulta:

$$T_I = \frac{4 Z_2 / Z_1}{(Z_2 / Z_1 + 1)^2} \quad (1)$$

Esta expresión se encuentra reflejada en la Figura 5 en la que se ve que, cuando ambos medios tienen la misma impedancia acústica, la transmisión es máxima; mientras que decrece de forma simétrica cuando el medio transmisor presenta mayor o menor impedancia que el incidente.

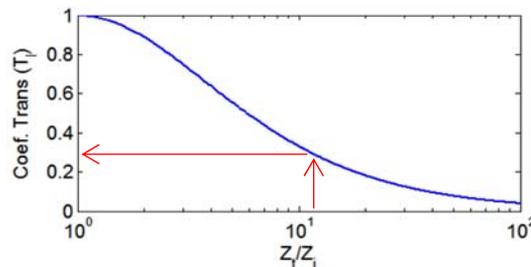


Fig. 5. Coeficiente de transmisión para una interfase entre dos medios

En la Figura 5 se muestra también el coeficiente de transmisión ($T_I \sim 0,26$) esperado entre una interfase de dos medios agua ($Z_i \sim 1,5 MRayls$) – cerámica ($Z_t \sim 20 MRayls$), como las que se utilizan en este trabajo.

II.3 Capas de adaptación (matching layers)

Las cerámicas piezoeléctricas por lo general tienen una impedancia acústica específica mucho mayor que las de las cargas habituales presentes en ultrasonidos de ensayo no destructivo (agua, tejido, metal,..). Como consecuencia, una cantidad importante de energía ultrasónica se refleja de nuevo en la interfaz piezoeléctrico/carga. Con el fin de optimizar la respuesta del ancho de banda de un transductor piezoeléctrico, se utilizan diferentes procedimientos de adaptación de impedancia acústica, buscando un compromiso entre la eficiencia y el ancho de banda.

El procedimiento básico consiste en incorporar uno o más juegos de capas entre la cara radiante/receptora del elemento piezoeléctrico y la carga acústica. Estas capas que emparejan, por lo general aunque no necesariamente, con un espesor igual a un cuarto de la longitud de onda de la resonancia mecánica fundamental, actúan como transformadores mecánicos con aumento de la carga mecánica en la interfase.

La impedancia característica Z_c de estas capas de adaptación (ML) se determina generalmente por medio del enfoque clásico de Collins [14]. En este trabajo se mostrará el modelo de una capa de adaptación (Apartado II.3.1) así como la generalización a un número cualquiera de capas (Apartado II.3.2) para posteriormente validar dichos modelos con una serie de montajes experimentales.

Los transductores de ultrasonidos utilizan los mismos principios, teniendo en cuenta que la desadaptación de impedancias es mucho mayor en este caso y que las impedancias acústicas características de los materiales pueden ser difíciles de obtener.



Fig. 6. *Ejemplo de capas de adaptación para los piezoelectricos*

II.3.1 Transmisión a través de una capa (1 matching layer)

El caso más sencillo de transmisión con capas de adaptación es el de estudiar un sistema formado por dos medios semi-infinitos entre los que se ubica una capa de material distinto a los anteriores con un espesor L determinado, tal como se puede ver en la Figura 7.

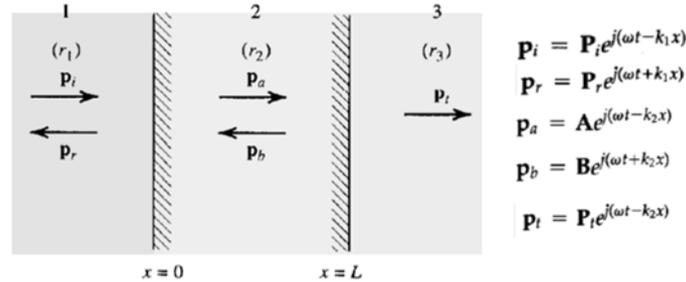


Fig. 7. Esquema para explicar el modelo de transmisión acústico a través de una capa

Nuevamente, esta disposición está ampliamente estudiada [1,2] y, siguiendo un proceso similar al anterior, obtenemos el siguiente coeficiente de transmisión de intensidad:

$$T_I = \frac{4}{2 + (Z_t/Z_i + Z_i/Z_t) \cos^2(k_1 L) + (Z_1^2/Z_i Z_t + Z_i Z_t/Z_1^2) \sin^2(k_1 L)} \quad (2)$$

Si se considera que se parte de que se conoce la impedancia acústica del medio donde se genera la señal acústica (Z_i) y del medio donde se recibe la señal (Z_t), se puede visualizar el comportamiento de esta expresión en función de los parámetros que conciernen a la capa intermedia (Z_1, k_1, L). Este estudio puede realizarse para dos casos distintos: cuando $Z_i < Z_t$ (equivalente a $Z_i > Z_t$) y cuando $Z_i = Z_t$. Se obviaré este último caso ya que no es de interés para los propósitos de este trabajo. Entonces, Para el caso $Z_i < Z_t$ (equivalente a $Z_i > Z_t$), el comportamiento del coeficiente de transmisión se muestra en la Figura 8 en la que, para mayor generalidad, en el eje de las abscisas se representa el cociente entre el espesor de la capa L y la longitud de onda λ , y en el eje de ordenadas el cociente entre la impedancia de la capa y la del medio transmisor Z_1/Z_t .

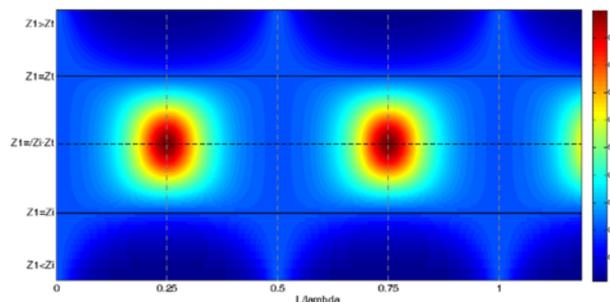


Fig. 8. Comportamiento general del coeficiente de transmisión para una capa en el caso $Z_i < Z_t$

En la Figura 8 se han señalado ciertos valores genéricos de impedancia en los que la transmisión presenta un comportamiento peculiar que intentamos explicar, complementariamente, en la Figura 9. En ella se muestra el comportamiento del coeficiente de transmisión para algunas relaciones concretas entre Z_i , Z_1 y Z_t .

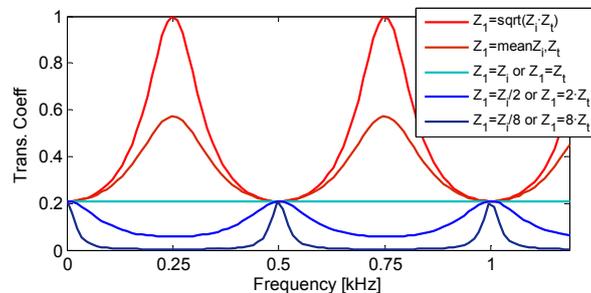


Fig. 9. Coeficiente de transmisión unicapa para distintas relaciones de impedancias entre los medios

En estos casos, se observa que:

- Si $Z_i < Z_1 < Z_t$ el máximo de transmisión se obtiene cuando la impedancia acústica de la capa intermedia cumple $Z_1 = \sqrt{Z_i \cdot Z_t}$ y, para una relación entre su espesor y su número de onda $L = \lambda_1/4n = c_1/4fn = \pi/2k_1n, n \text{ impar}$. Éste es el caso entre el cristal pyrex y una cerámica cuando interponemos una capa de aluminio entre ambos, o bien entre el agua y la cerámica cuando únicamente está el cristal pyrex como capa intermedia.
- Si $Z_1 < \min\{Z_i, Z_t\}$ ó $Z_1 > \max\{Z_i, Z_t\}$, es decir, si la impedancia de la capa no está comprendida entre la de los medios adyacentes, la transmisión presenta un máximo en 0 kHz y en $L = \lambda_1/2n, n \text{ impar}$, independientemente de la relación de impedancias, pero con valor menor mucho menor al máximo absoluto. Éste caso no es de interés dado que en las configuraciones de transductores que se estudian en este trabajo, cada capa de material tiene una impedancia mayor a la anterior, desde el agua hasta el piezoeléctrico.

En el apartado V.5.1 se implementa la ecuación (1) para obtener la frecuencia de máxima transmisión esperada para cada una de las capas de adaptación interpuestas entre el agua y cada una de las cerámicas piezoeléctricas, y compararemos los resultados con las medidas experimentales.

II.3.2 Transmisión a través de n-capas (n matching layers)

Se puede generalizar el estudio anterior a un número cualquiera de capas imponiendo las condiciones de continuidad en cada una de las interfases y estableciendo las relaciones entre amplitudes adecuada para obtener, finalmente, el coeficiente de transmisión acústica. El esquema planteado para resolver este problema se muestra en la Figura 10. Aquí se va a mostrar un proceso de cálculo, similar al anterior, basado en el cálculo iterativo de los cocientes de las amplitudes de las ondas estacionarias en cada medio.

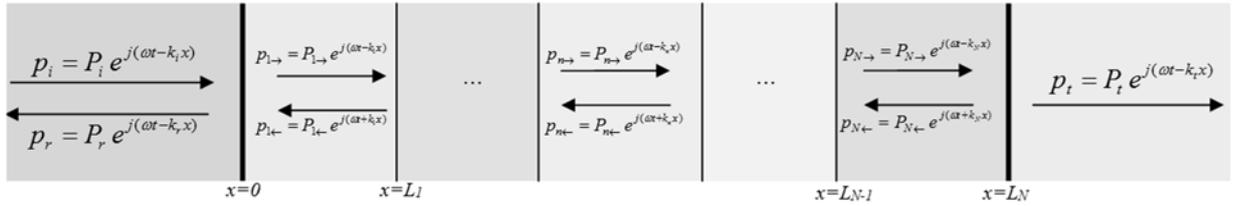


Fig. 10. Esquema para explicar el modelo de transmisión acústico a través de varias capas

Aquí se muestra únicamente los pasos necesarios para resolver el problema:

1º) calcular para la última capa N:

$$\frac{P_{N\rightarrow}}{P_{N\leftarrow}} = \frac{e^{2jk_N L_N} (Z_t + Z_N)}{Z_t - Z_N} \quad (3)$$

2º) para cada capa n, desde N-1 hasta 1:

$$\frac{P_{n\rightarrow}}{P_{n\leftarrow}} = \frac{e^{2jk_n L_n} \left(e^{2jk_{n+1} L_{n+1}} (Z_{n+1} - Z_n) + \frac{P_{n+1\rightarrow}}{P_{n+1\leftarrow}} (Z_{n+1} + Z_n) \right)}{e^{2jk_{n+1} L_{n+1}} (Z_{n+1} + Z_n) + \frac{P_{n+1\rightarrow}}{P_{n+1\leftarrow}} (Z_{n+1} - Z_n)} \quad (4)$$

3º) el coeficiente de reflexión queda:

$$R = \frac{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}} (Z_1 - Z_i) + Z_1 + Z_i}{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}} (Z_1 + Z_i) + Z_1 - Z_i} \quad (5)$$

4º) el coeficiente de transmisión de intensidad acústica es:

$$T_I = 1 - R_I = 1 - |R|^2 \quad (6)$$

A pesar de la generalidad de este modelo, aquí únicamente interesa por el caso particular de dos capas: una primera capa de 2,2 mm de espesor de cristal pyrex, que no puede variar, y una segunda capa cuyo material y dimensiones son elegibles a conveniencia. En el Capítulo IV se muestran las distintas configuraciones analizadas y la implementación de dicho modelo, así como su validación en el Apartado V.5.2.

III. Construcción

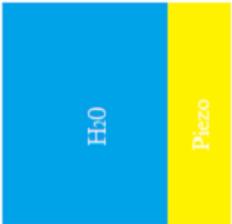
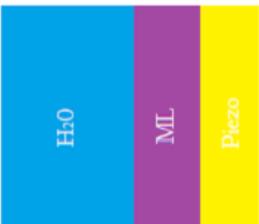
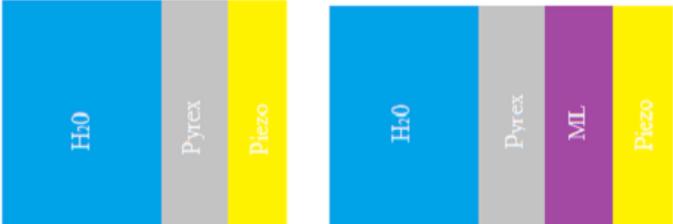
III.1 Configuraciones realizadas

Este estudio se ha realizado con 3 tipologías de configuraciones:

- **Configuración 1:** trata únicamente de los piezoeléctricos libres en agua, es decir, de acuerdo con la transmisión para 1 capa.
- **Configuración 2:** similar a la configuración 1 pero añadiendo los diferentes ML pegados al piezoeléctrico, es decir, transmisión entre 2 capas.
- **Configuración 3:** similar a la configuración 2 pero con el ML pegado al cristal pyrex, modelo de transmisión entre n-capas.

El cristal pyrex, el aluminio y el piezoeléctrico se han caracterizado mediante distintos métodos, tal como se puede ver en el Capítulo IV. Aquí se muestra únicamente la densidad y velocidad de propagación de cada uno de los medios que se disponía para realizar los experimentos.

Parámetros del medio			
Elemento	Velocidad Propagación [m/s]	Densidad [kg/m ³]	Impedancia [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Cristal Pyrex*	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio*	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255*	2381,0	7719	18,37
Aire	343	1,29	0,442

Configuraciones estudiadas	
<p>Configuración 1 cerámicas sueltas</p> 	<p>Configuración 2 cerámicas sueltas con matching layers</p> 
<p>Configuración 3 cerámicas con matching layer pegadas a la vasija</p> 	
<p>*pegado sin ML</p>	

III.1.1 Configuración 1: cerámicas sueltas

Para conectar la placa cerámica a una tensión se realiza la soldadura de los cables a las dos caras de la cerámica se ha utilizado un soldador y estaño, dejando la menor capa posible en la cerámica.



Fig. 11. Ejemplo soldadura para alimentar la cerámica



Fig. 12. Muestra de las cerámicas disco soldadas a los cables para medición

III.1.2 Configuración 2: cerámicas sueltas con matching layers

A partir de la configuración 1 se ha procedido al pegado de los ML de aluminio a la cerámica, que se ha realizado mediante un adhesivo especial de plata (Anexo IV) para garantizar un buen contacto eléctrico entre las partes. Esta capa de adhesivo debe de ser del menor espesor posible. Para asegurar el máximo paralelismo entre las caras se mantendrá fijado durante un tiempo prudencial para su correcto posicionamiento. Se debe tener en cuenta que esta capa, que debe ser lo más fina posible, introduce incertidumbre en los resultados ya que no se conocen con detalle las características de éste.



Fig. 13. *Tipologías cilíndricas con ML*



Fig. 14. *Resultado final de los transductores tipo cilindro*



Fig. 15. *Tipologías de discos con ML*



Fig. 16. *Resultado final de los transductores tipo disco*

III.1.3 Configuración 3: cerámicas con matching layer pegadas a la vasija

Para el pegado de los ML de aluminio a la cerámica se ha realizado mediante un adhesivo especial de plata (anexo IV) para garantizar un buen contacto eléctrico entre las partes. Esta capa de adhesivo debe de ser del menor espesor posible. Para asegurar el máximo paralelismo entre las caras se mantendrá fijado durante un tiempo prudencial para su correcto posicionamiento.

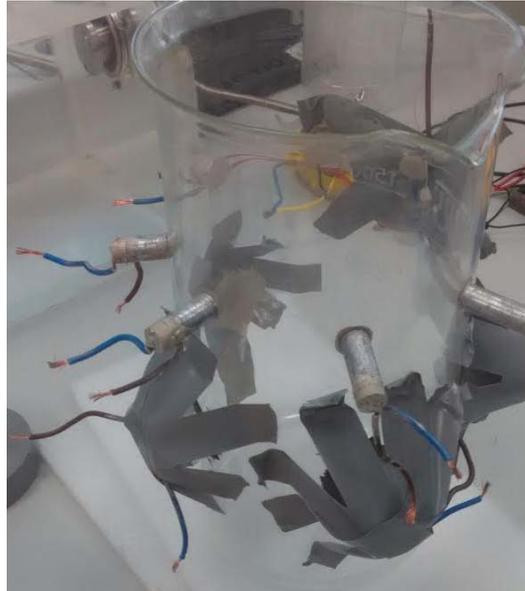


Fig. 17. *Conjunto de piezos pegado a la vasija.*



Fig. 18. *Conjunto de piezos pegado a la vasija.*

III.2 Elección del matching layer adecuado

III.2.1 Frecuencias y ancho de banda a potenciar

El ancho de banda que se potenciará será aquel dónde se encuentre el pico de admitancia del conjunto vasija + piezoeléctrico libre, para esto lo primero será medir la impedancia de los piezoeléctricos y a partir de ahí se procederá al diseño de la capa de adaptación.

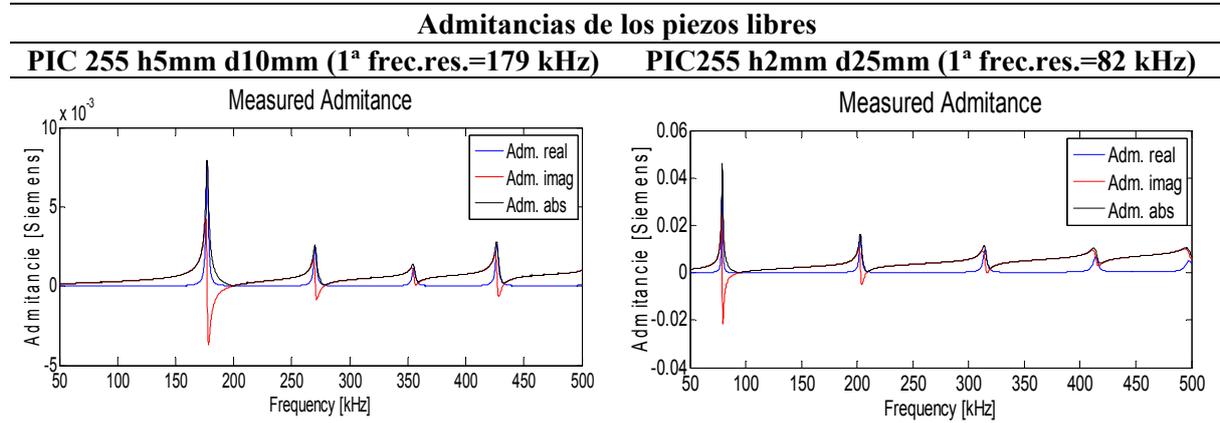


Fig. 19. Admitancia de los piezoeléctricos libres

Las frecuencias de resonancia de los discos dependen del diámetro de los piezoeléctricos básicamente (modo radial de vibración) ya que, al ser su espesor es mucho menor (diámetro = 10 espesor), las frecuencias de resonancia correspondientes al modo espesor son de más alta frecuencia (~MHz). En el caso de los cilindros, las frecuencias de resonancia dependen tanto de su diámetro como de su espesor ya que ambas son similares ($\phi = 2\text{mm}$ espesor).

Posteriormente, se han realizado las medidas de impedancia de las cerámicas pegadas directamente a la vasija, para observar cómo varían afecta esta configuración inicial a las frecuencias de resonancia.

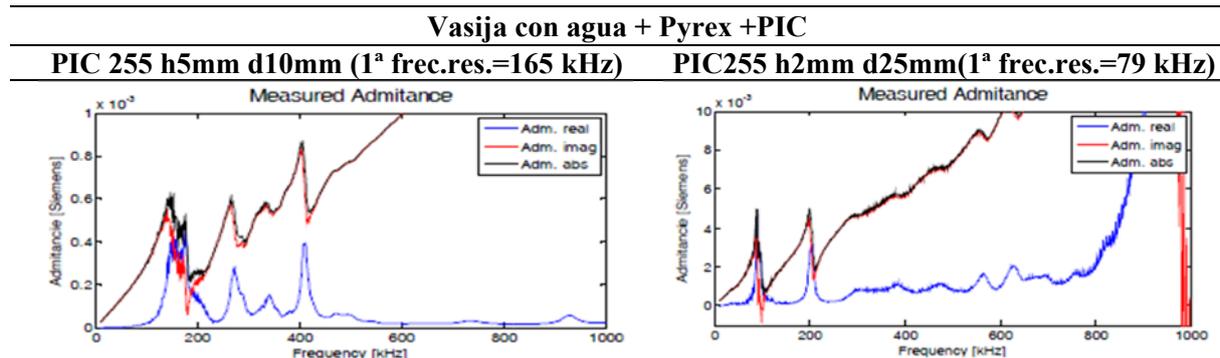


Fig. 20. Admitancia de los piezoeléctricos pegados a la vasija de pyrex con agua

Se observa cómo los picos de resonancia han aparecido a frecuencias ligeramente más bajas, esto es debido al aumento de la masa y espesor del sistema (vasija + piezoeléctrico). De acuerdo con estos resultados, y a partir de los picos de admitancia de los piezoeléctricos con la vasija llena, se va a intentar optimizar la transmisión utilizando un matching layer para que no haya un cambio tan brusco entre las impedancias de los elementos en contacto.

III.2.2 Elección del material óptimo para el ML

Para intentar maximizar la transmisión se utilizará un ML cuya impedancia sea la adecuada para que no haya excesiva diferencia de impedancias entre elementos en contacto y, con ello, hacer progresiva la adaptación de impedancias. En la Tabla 1 se muestran las impedancias acústicas de los materiales que partimos para poder estudiar la deseada y elegir el ML adecuado.

Elemento	c [m/s]	ro [kg/m ³]	Zc [MRayls]
Agua	1500	1000	1,50
Cristal Pyrex	4939,5	2230	11,01
PIC 255	2381,0	7719	18,37
Aire	343	1,29	0,44

Tabla 1. Valores de impedancia, velocidad de propagación y densidad

Únicamente interesan los metales que tengan una impedancia que esté entre la del pyrex y la del piezo, ya que la impedancia agua pyrex siempre va a estar presente. Metales como el cobre, hierro o germanio tienen impedancias mayores a las del PIC por lo que se consiguen grandes coeficientes de transmisión. Según se ha visto en el Apartado I.3, el material ideal intermedio entre ambos medios sería aquel que cumpla $Z_1 = \sqrt{Z_i \cdot Z_t}$ que, para nuestro caso, debe ser $\sqrt{11,01 \cdot 18,37} = 14,22 \text{ Mrayls}$.

De acuerdo con las características de los diferentes metales se ha decidido utilizar **ML de aluminio** ($Z_1 = 17,2 \text{ Mrayls}$) pues cumple bastante bien la condición $Z_i < Z_1 < Z_t$ y además se trata de un material accesible. Entonces, la evolución de las impedancias en nuestro experimento queda como se muestra en la Tabla 2.

Elemento	c [m/s]	ro [kg/m ³]	Zc[MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Aluminio	6400	2698	17,2
PIC 255	2381,0	7719	18,37
Aire	343	1,29	$4,42 \cdot 10^{-6}$

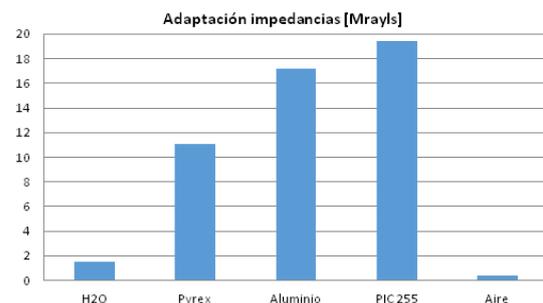


Tabla 2. Valores de impedancia, velocidad de propagación y densidad y gráfica impedancia de los diferentes materiales

Otros materiales presentan también impedancias en torno a la deseada como el plomo y el estaño pero en estudios anteriores [23], debido a su mayor absorción y menor homogeneidad, se ha preferido hacer el estudio con aluminio.

III.2.3 Cálculo de los espesores del ML

A continuación se obtienen los espesores que debería tener la capa de aluminio para cada uno de los picos de resonancia de las admitancias mostradas en el Apartado III.2.1, teniendo en cuenta que en una primera aproximación la máxima transmisión tiene lugar cuando el ML tiene un espesor de $\lambda/4$ y $\lambda/2$. Con ellos los espesores que interesan son los que cumplen $e = c/4f$ ó $e = c/2f$, donde f es la frecuencia en la que tiene el pico de admitancia.

PIC 255 Ø10mm, h5mm		PIC 255 Ø25mm, h2mm	
Espesores para $\lambda/4$		Espesores para $\lambda/4$	
f_{res} [kHz]	Espesor [mm]	f_{res} [kHz]	Espesor [mm]
144	11,11	90	17,78
180	8,89	200	8,00
270	5,93	Espesores para $\lambda/2$	
Espesores para $\lambda/2$		f_{res} [kHz]	Espesor [mm]
144	22,22	90	35,55
180	17,78	200	16
270	11,85		

*Las frecuencias de resonancia corresponden a los picos de admitancia para el PIC pegado a la vasija llena de agua

Tabla 3. Frecuencias de resonancia y espesores para el ML de aluminio

Con los resultados anteriores, se tiene una idea de las dimensiones que deben tener los ML de aluminio. Para poder contrastar los resultados así como para validar el modelo unicapa y multicapa que se ha expuesto en el Capítulo II, se ha utilizado una amplia gama de piezas de aluminio cortadas con torno de modo que cubran los espesores anteriores (Tabla 4).

Dimensiones ML de aluminio			
Cerámica	Nombre	Espesor [mm]	Ø [mm]
PIC 255 Ø10mm h5mm	ML1	7,7	10
	ML2	8,9	10
	ML3	16,1	10
	ML4	21,5	10
	ML5	23,8	10
	ML6	31,1	10
PIC 255 Ø25mm h2mm	ML7	15	25
	ML8	20	25
	ML9	25	25
	ML10	30	25

Tabla 4. Espesores y diámetros de los ML de aluminio

IV. Caracterización

IV.1 Caracterización de materiales individuales

La *impedancia acústica característica* es una magnitud de intensiva que caracteriza la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre éste. Por tanto, en el estudio de transmisión acústica que se está trabajando en este TFM, es uno de los parámetros que más interesa obtener de cada uno de nuestros materiales. Puede calcularse a partir de la velocidad del sonido en el medio (c) y de la densidad del medio (ρ) como:

$$Z = \rho \cdot c \quad (7)$$

Entonces, para conocer la impedancia característica de cada uno de los medios con los que se ha trabajado, se tiene que obtener previamente ρ y c .

IV.1.1 Obtención de las velocidades del sonido

Para poder obtener el valor de la velocidad con la que se propaga la onda acústica se recurre a la técnica del eco-impulso. Para ello se necesita, por un lado, conocer el espesor de una muestra del material en cuestión (l) y, por otro, mediante la ayuda de un generador-receptor de impulsos saber el tiempo que se tarda en recibir los ecos generados por estos impulsos al reflejarse desde la cara opuesta a donde se está emitiendo (t). Con ello, mediante la expresión $c = 2l/t$ se obtiene la velocidad de propagación. En la Figura 21 se muestra una de las señales registradas con el osciloscopio, en la que se pueden distinguir la señal enviada (que interfiere con el primer eco) así como los demás ecos.

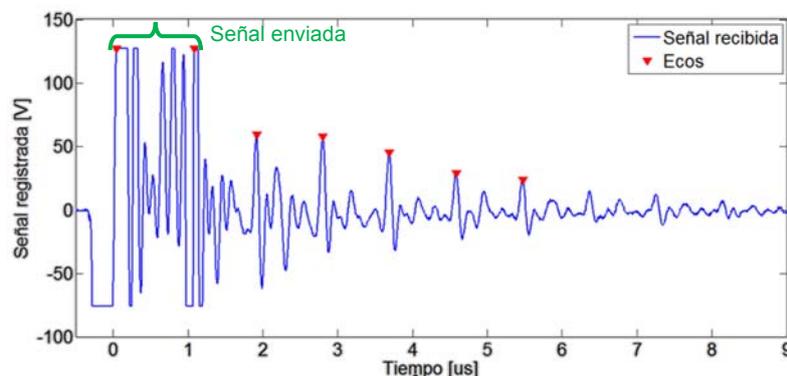


Fig. 21. Conjunto de piezos pegado a la vasija.

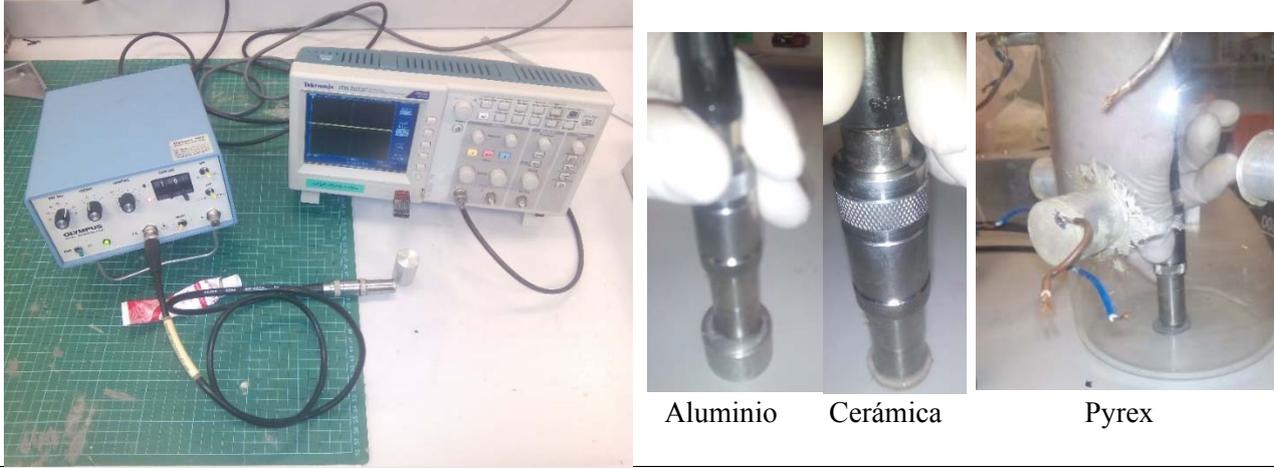
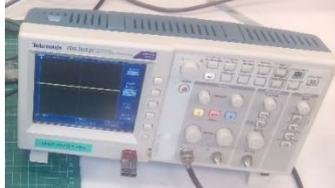
Se tomará la diferencia de tiempos entre cada uno de estos picos para obtener valores del tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que tarda la señal acústica entre ir de la cara de la muestra donde se encuentra el transductor, llegar a la cara opuesta, y volver a la superficie del transductor.

A partir de estas medidas y sabiendo los espesores de cada muestra se ha obtenido las siguientes velocidades del sonido de los materiales de interés:

Elemento	Espesores [mm]	Velocidad de propagación [m/s]
Cristal Pyrex	2,2	4939,5 ± 23
ML Aluminio	15,2	6335,0 ± 36
PIC 255	2	2381,0 ± 40

Tabla 5. Espesor y velocidad de propagación de los materiales

(*) valores +/- incertidumbre total.

Instrumentos utilizados para el eco-impulso	
	
Instrumento	Imagen y descripción
Emisor receptor de eco-impulso	 <p>Se trata de un dispositivo que genera y registra impulsos eléctricos de alta frecuencia (varios MHz) y poca duración ($< 1 \mu\text{s}$), para poder discernir las señales emitidas de las recibidas (ecos).</p>
Transductor	 <p>Transductor de ultrasonidos colocado sobre la superficie de la muestra (con una fina capa de vaselina intermedia para mejorar la transmisión), con el que se realizará la emisión y recepción del impulso acústica en la muestra a caracterizar.</p>
Osciloscopio	 <p>Permite visualizar las lecturas de la señal enviada y recibida en una misma línea temporal. Además permite realizar capturas y el volcado de datos a una unidad de memoria.</p>

IV.1.2 Obtención de las densidades

El valor de la densidad se ha obtenido midiendo el volumen de cada una de las muestras de material (V) mediante un pie de rey, y pesando cada una de ella (m) mediante una balanza electrónica, que se muestra en la Figura 22. Así, la densidad se calcula por $\rho = m/V$.



Fig. 22. Balanza electrónica y pie de rey utilizados en las mediciones

Los valores obtenidos para las densidades se muestran en la Tabla 6.

Elemento	Volumen [mm ³]	masa [g]	ρ [kg/m ³]
Cristal Pyrex*	-	-	2230
ML Aluminio	7461,06	20,5	2747,6 ± 13
PIC 255	628,3	4,85	7719 ± 160

Tabla 6. Valores del volumen, masa y densidad de las diferentes muestras

(*) El volumen del pyrex no se conoce, se supondrá la densidad especificada por el fabricante [Anexo IV].

IV.1.3 Obtención de las impedancias acústicas características

A partir de los datos anteriores, se puede calcular la impedancia características de los diferentes materiales mediante la expresión (7):

Elemento	c [m/s]	ρ [kg/m ³]	Z_C [MRayls]
Cristal Pyrex	4939,5 ± 23	2230	11,01 ± 0,06
ML Aluminio	6335,0 ± 36	2747,6 ± 13	17,41 ± 0,19
PIC 255	2381,0 ± 40	7719 ± 160	18,37 ± 0,69

Tabla 7. Valores de la velocidad de propagación, densidad y impedancia según las muestras caracterizadas.

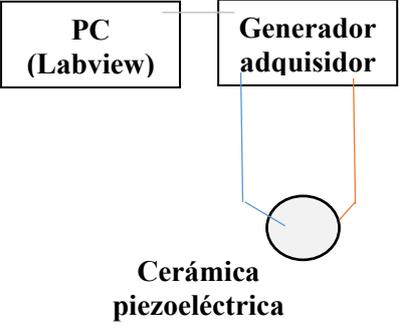
Estos serán los valores con los que se desarrollará este TFM.

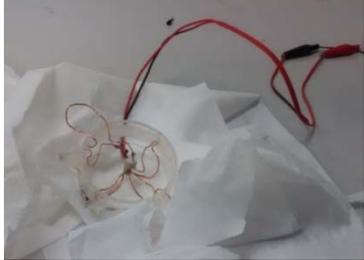
IV.2 Caracterización de transductores

Las características que mejor definen a los transductores piezoeléctricos son la *impedancia eléctrica* y *sensibilidad*. Los métodos utilizados para obtener dichos valores se describen a continuación.

IV.2.1 Obtención de la impedancia eléctrica

Para la realización de la medida de la impedancia y admitancia eléctrica se necesita un generador-adquisidor de señales eléctricas, el cual enviará señales de distintas frecuencias con una misma amplitud (V) a la cerámica, y registrará la respuesta de la misma.

Ficha para la medida de impedancia de un transductor						
						
Instrumentación	Condiciones entorno		Medidas		Param. Software	
PC Generador adquisidor Conexión cableado	Humedad Rel.	80%	Señal Emit.	Seno	Config.	Serie
	T ^a (C)	20	F.Ini [kHz]	10		
			F.Fin [kHz]	250	V	500m
			Step F[kHz]	0,1	Nº Medidas	3
Procedimiento	Se conecta la instrumentación a las dos patitas de conexión (soldadas previamente a cada una de las caras de la cerámica). Consiste en medir mediante diferencia de potenciales la respuesta que nos devuelve el transductor. Desde el mando se enviarán señales senoidales (3 por frecuencia). Introducir los parámetros de forma correcta. Crear una carpeta nueva y especificar ruta para su almacenamiento. Una vez estén todas las medidas realizadas se procederá a su tratamiento de datos mediante matlab para poder comparar, filtrar, etc.					
Observaciones	Las características y especificaciones de la instrumentación se encuentran en los anexos. Se utiliza el programa específico del fabricante.					

Instrumental utilizado para la medida de impedancia	
	
Instrumento	Imagen y descripción
Medidor de impedancias	 <p>Dispositivo Wayne Kerr 6500P 20Hz - 5MHz High Frequency Digital LCR Meter, capaz de medir el voltaje y la intensidad de un elemento piezoeléctrico conectado en serie o paralelo. Se encarga, siguiendo órdenes del PC, de obtener la impedancia eléctrica a distintas frecuencias.</p>
Conexión cableado	 <p>Se trata de un utensilio para garantizar un buen contacto entre las caras de la cerámica, en caso de no tener el cableado soldado. Conexión cableado y garantizar un buen contacto</p>

En la Figura 23 se muestra un ejemplo de las admitancias obtenidas de una cerámica libre, cuando se coloca un ML de aluminio y cuando se pega a la vasija.

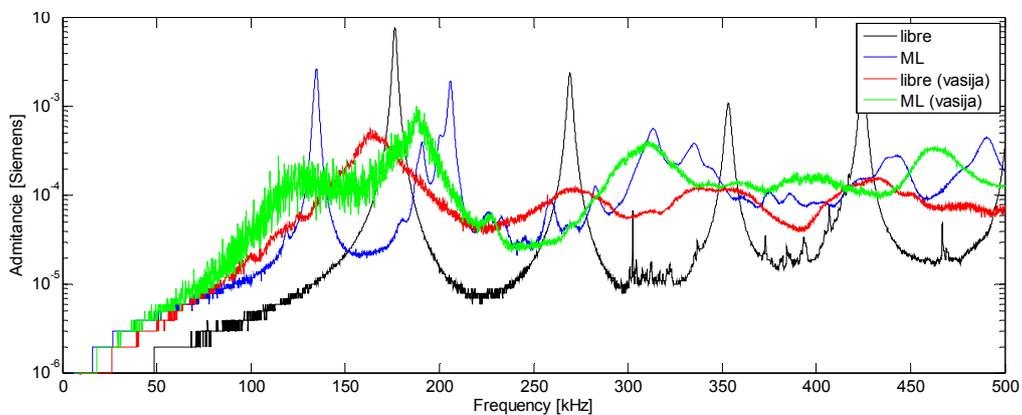


Fig. 23. Ejemplo gráfica admitancia de un piezoeléctrico

IV.2.2 Sensibilidad (RVR)

La sensibilidad acústica es una de las características que definen a los transductores. Se trata de la capacidad que tiene un transductor para emitir o recibir una señal a una frecuencia determinada, es decir, para una señal con el mismo nivel sonoro tendrá mayor sensibilidad en las que el transductor reciba mayor señal. Según la tipología del trabajo y de las necesidades se optará por un transductor con mayor sensibilidad a ciertas frecuencias u otro.

La sensibilidad de cada transductor en cada configuración se ha cuantificado mediante el llamado *Received Voltage Response* (RVR), que se define como:

$$RVR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{rms}}{p_{eff}} \right) \left[dB \text{ re } \frac{1V}{\mu Pa} \right] \quad (8)$$

Donde:

- RVR es la sensibilidad en recepción del transductor, que se calcula para cada frecuencia, en nuestro caso desde 10 kHz hasta 250 kHz.
- p_{eff} es el valor eficaz de la presión sonora de la onda acústica que incide sobre la superficie del transductor [V].
- V_{rms} es el voltaje rms registrado en bordes del transductor cuando incide dicha señal [uPa].

En la Figura 24 se muestra un ejemplo de la sensibilidad de una de las cerámicas libres, y pegadas a la vasija.

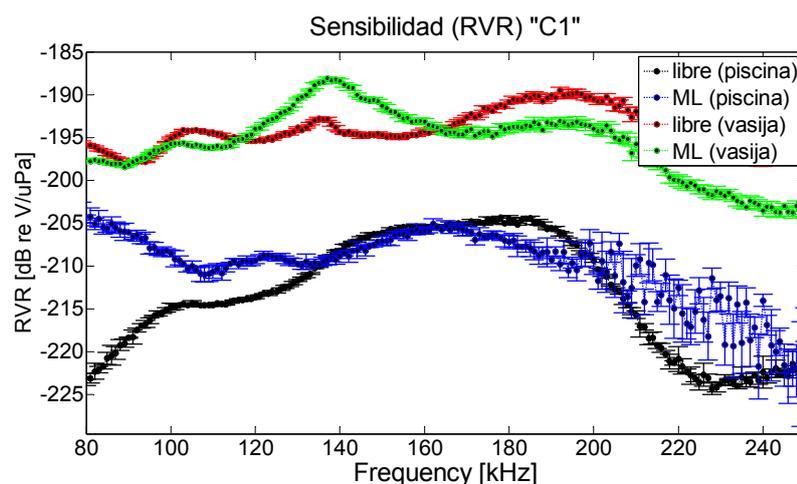
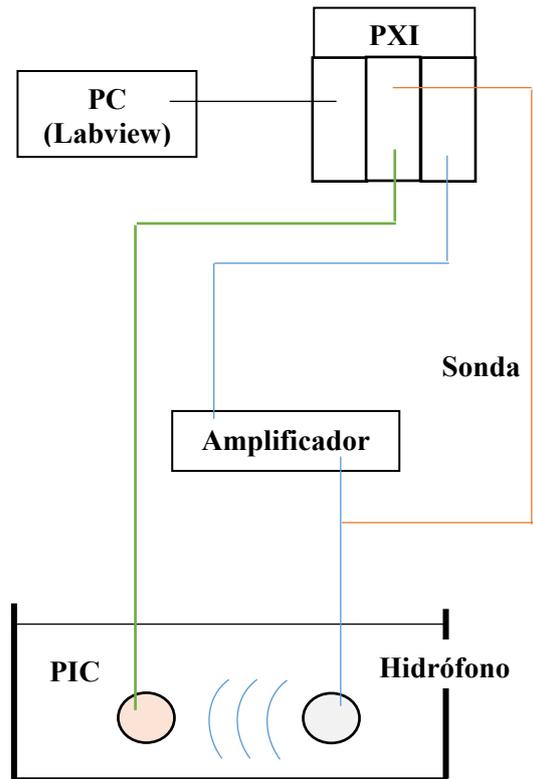
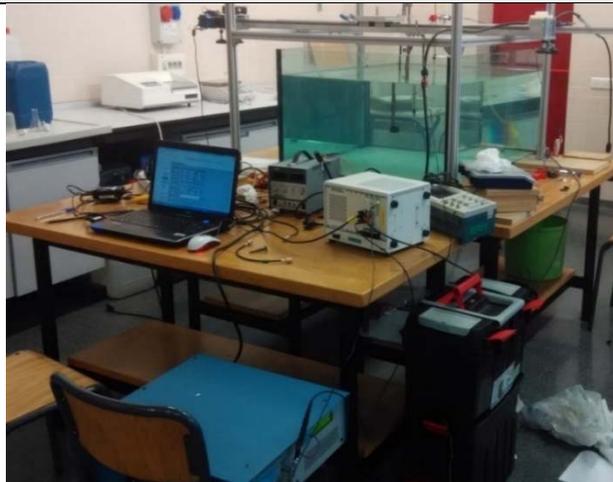


Fig. 24. Ejemplo gráfica sensibilidad de un piezoeléctrico con diferentes cofiguraciones.

Ficha de medida sensibilidad de un transductor en una piscina y vasija



Medidas en piscina

Instrumentación	Condiciones entorno		Medidas		Param. Software	
PC	Humedad Rel.	80%	Señal Emit.	Seno	Ch1	Emisor
Amplificador	Tª(C)	20	F.Ini (kHz)	10	Ch2	Receptor
Sonda	Dimensiones piscina (cm)	120x80x60	F.Fin (kHz)	250	V	600m
Generador adquisidor	Distancia E-R	20cm	Step F (kHz)	1	Nº Medidas	5
Hidrófono						

Medidas en vasija

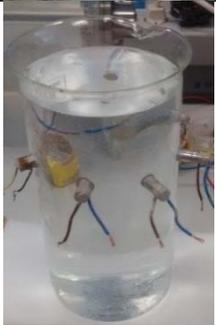
Instrumentación	Condiciones entorno		Medidas		Param. Software	
PC	Humedad Rel.	80%	Señal Emit.	Seno	Ch1	Emisor
Amplificador	Tª(C)	20	F.Ini (kHz)	10	Ch2	Receptor
Sonda	Dimensiones vasija (cm)	ø11x30	FFin (kHz)	250	V	100m
Generador adquisidor	Distancia E-R	20cm	Step F (kHz)	1	Nº Medidas	3
Hidrófono						

Procedimiento

Se conecta la instrumentación a las dos patitas de conexión (soldadas previamente a cada una de las caras de la cerámica).
 Consiste en medir mediante diferencia de potenciales la respuesta que nos devuelve el transductor. Desde el mando se enviarán señales senoidales (3).
 Introducir los parámetros de forma correcta
 Crear una carpeta nueva y especificar ruta para su almacenamiento.
 Una vez estén todas las medidas realizadas se procederá a su tratamiento de datos mediante Matlab para poder comparar, filtrar,...

Observaciones

Las características y especificaciones de la instrumentación se encuentra en los anexos
 Se utiliza el programa xxxx.lbw (diseñado por el DFA UPV)

Instrumental utilizado para la medida de impedancia		
Instrumento	Imagen y descripción	
Piscina		Tanque de agua utilizado para la realización de las medidas, piscina. Dimensiones 120x80x60cm Material vidrio
Vasija		Recipiente de agua utilizado para la realización de las medidas, vasija. Debe estar apoyado en la base por algún elemento que absorba las vibraciones y que pueden introducirse en las medidas. Dimensiones $\varnothing 11 \times 30$ cm. Material cristal pyrex
PC		Ejecutar scripts para la realización de la toma de datos enviados y recibidos. Envío y recepción de señales de forma predeterminada Software: Matlab, Labview.
Amplificador		Dado que el nivel sonoro del paramétrico es notablemente inferior al de las frecuencias primarias que interactúan, se ha utilizado un amplificador de potencia Amplificador 2100L RF de E&I,
Sonda 100x		La sonda se utiliza para atenuar la señal 100 veces y poder registrarla con el PXI.
Hidrófonos de referencia		Para convertir las señales eléctricas generadas por el generador de funciones y amplificadas posteriormente, en señales acústicas es necesaria la utilización de transductores electro-mecánicos. En este caso hidrófonos. Hidrófono: FFR Sx60 (vasija) y Sx30 (piscina)
PXI Sistema adquisición generador		Se encarga, siguiendo órdenes del PC, de enviar señales por una de sus canales y recibir señales por diferente canal. Generador emisión y recepción de datos. GA: National Instrument PXI 1031-DC

IV.3 Pretratamiento de los datos

Desde el proceso de toma de datos, se han tenido en cuenta distintos aspectos que pueden afectar a la validez de los resultados y que son inherentes, de una forma y otra, a todo proceso de calibración [8,10]. A continuación se comenta cada uno de estos aspectos mostrando su influencia en las medidas y la forma en la que se han tenido en cuenta.

IV.3.1 Ondas electromagnéticas (OEM)

Las ondas electromagnéticas aparecen siempre puesto que son intrínsecas con el instrumental que se utiliza. Dado que las OEM son las primeras en aparecer (lógicamente al viajar la onda electromagnética mucho más rápido que el sonido en el medio), una primera limitación a la hora de realizar las calibraciones de los transductores es la distancia emisor-receptor pues, para algunas frecuencias, la onda electromagnética solapará a la primera recepción acústica.

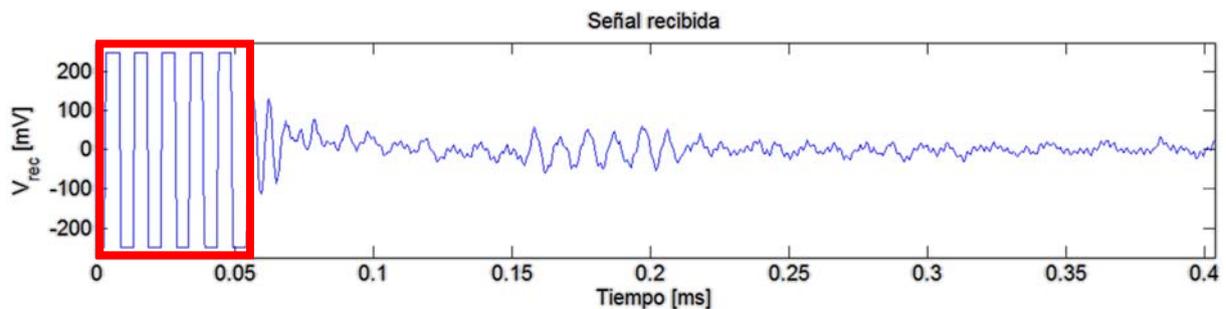


Fig. 25. Onda electromagnética señal recibida encuadrada en un rectángulo rojo

Este solapamiento será más visible en las medidas en la vasija, dado que la distancia emisor-receptor es pequeña, pero a su vez la señal acústica recibida es mayor, por lo que a pesar del solapamiento para las más bajas frecuencias, este efecto se ve parcialmente mitigado.

IV.3.2 Ruido fondo

Para todas las configuraciones se han realizado medidas de ruido de fondo para asegurar que el nivel de la señal emitida este por encima del nivel del ruido de fondo (relación señal emitida/ruido elevada). Se ha observado que en ciertas frecuencias existen picos aleatorios que publicaban el voltaje de fondo. Aun así, cómo eran picos puntuales y se encontraban frecuencias muy elevada (>500 kHz), se han podido eliminar mediante filtrado.

IV.3.3 Reflexiones producidas

Por efecto de la reflexión en las paredes de la piscina o la vasija, la señal recibida se verá modificada si las reflexiones llegan antes de que termine la recepción de la señal directa.

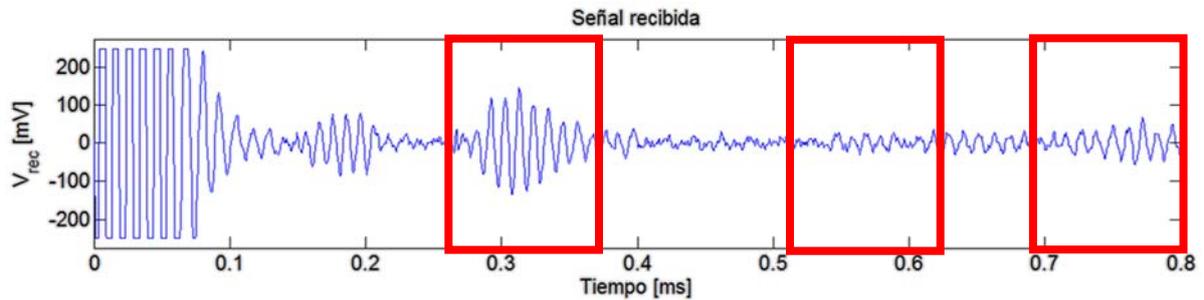


Fig. 26. Reflexiones en la señal recibida

En las medidas en piscina, para poder distinguir ambas señales se ubican emisor y receptor lo más alejados de las paredes, el fondo y la superficie, mientras que en las medidas en vasija la propia geometría la propagación más rápida por las paredes hará que haya cierta interacción entre señales, pero que puede mitigarse reduciendo el número de ciclos enviados.



Fig. 27. Imágenes de la piscina de laboratorio



Fig. 28. Imagen de la vasija de pyrex con piezos pegados

IV.3.4 Precisión en la separación emisor-receptor

La distancia entre emisor y receptor debe ser similar para todas las medidas ya se realicen en la vasija o en la piscina. En un primer paso, se mide dicha distancia mediante una cintra métrica pero posteriormente, la separación se calcula mediante la detección por correlación cruzada entre la señal recibida y la enviada. Dicho método ha sido convenientemente testeado con éxito tal como puede verse en [8].



Fig. 29. Señal recibida ruido de fondo

En la Figura 30 se puede observar el resultado de los tiempos de vuelo obtenidos por correlación cruzada entre cada una de las señales recibidas y las enviadas. En ella se puede apreciar cómo estos presentan una baja variabilidad para las distintas frecuencias estudiadas a partir de 50 kHz, dado que para frecuencias inferiores la duración de la señal enviada es mayor que la distancia emisor-receptor. Además, dicho tiempo de vuelo es semejante al obtenido geoméricamente.

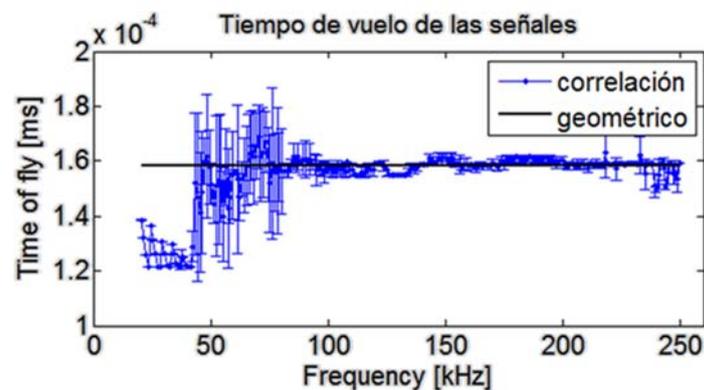


Fig. 30. Tiempo de vuelo obtenido mediante correlación cruzada entre señal recibida y enviada (azul), y la derivada de la medida geométrica entre emisor y receptor (negro)

IV.4 Análisis de datos

Una vez tenidos en cuenta cada uno de los aspectos anteriores que podrían influir en nuestro proceso de medida, se ha procedido al propio procesado de los datos siguiendo el esquema que se señala a continuación. En él, se emplean distintos métodos para obtener una misma solución, operando las señales en distintos dominios: dominio de tiempos, de frecuencias, y de correlación. Con ello, se podrá comparar y afianzar los resultados.

IV.4.1 Filtrado de la señal

Cada una de las señales estudiadas (tanto la enviada desde el emisor de referencia, como la recibida por cada una de las cerámicas piezoeléctricas) han sido previamente filtradas. El filtro se aplica a cada señal cortada en el número de ciclos enviados, mediante un filtro fir de orden variable según la frecuencia del tono estudiado entre 10 y 100, y con unas frecuencias de corte de 0.9 y 1.1 veces la frecuencia en estudio. En la Figura 31 se muestra el resultado del filtrado de una de las señales registradas en bornes del hidrófono emisor y la recibida por una cerámica.

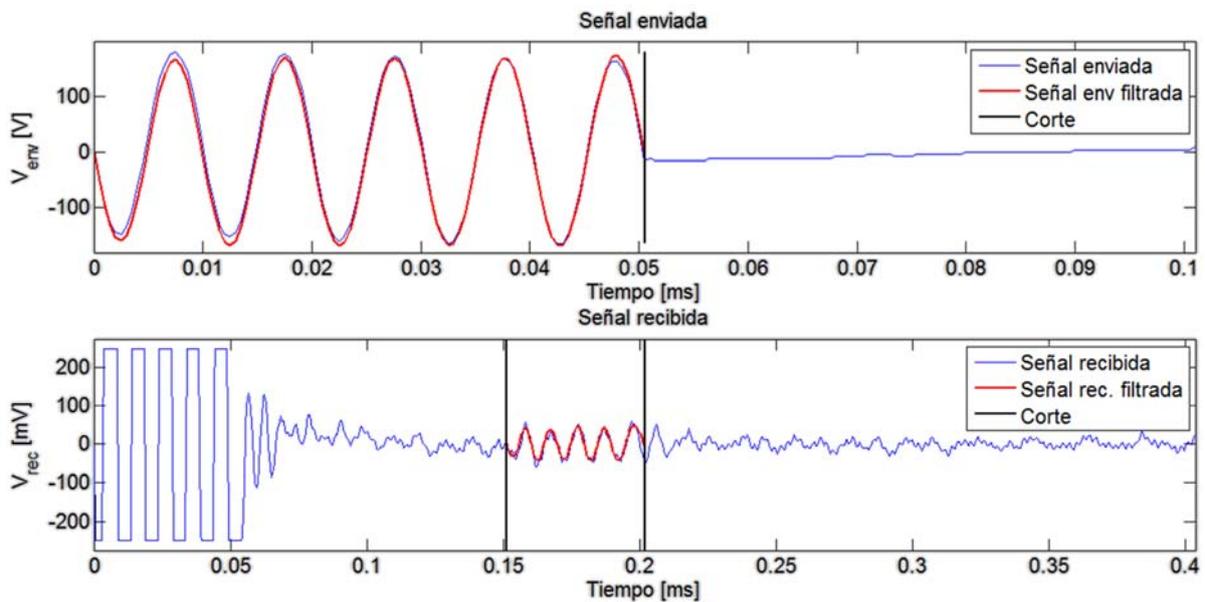


Fig. 31. Señal enviada y señal recibida con detección de la señal enviada

Una vez filtradas cada una de las señales se procede a su análisis para obtener los valores de voltaje característicos de las mismas, mediante el procedimiento que se muestra en el siguiente apartado.

IV.4.2 Protocolo de análisis

1. Cargado de señales de interés:

1.1 Señales enviadas, recibidas, ruido.

1.2 Configuración del filtro, tal como se ha visto anteriormente.

2. Estudio de señales enviadas, recibidas y ruido:

2.1 Estudio señal enviada:

- Recortar a la duración de la señal generada (T_{env}) desde el instante inicial $t = 0s$
- Filtrar a la banda correspondiente \rightarrow se obtiene señal en tiempo: $V(t)_{env,cort,filt}$
- Espectro de frecuencia (sin filtrar) \rightarrow se obtiene señal en frecuencia: $TF\{V(t)_{env,cort}\}$

2.2 Estudio señal recibida:

- Recortar a la duración de la señal generada (T_{env}) desde el tiempo donde se ha detectado la señal mediante correlación cruzada con la enviada, $t_{esperado}$.
- Filtrar a la banda correspondiente \rightarrow se obtiene señal en tiempo: $V(t)_{rec,cort,filt}$
- Espectro de frecuencia (sin filtrar) \rightarrow se obtiene señal en frecuencia: $TF\{V(t)_{rec,cort}\}$

3. Cálculo de valores de voltaje característicos de las señales enviadas, recibidas y ruido, para cada uno de los tonos estudiados:

3.1 En tiempo:

$$V_{p,env,tiempo} = \sqrt{2} \cdot V_{rms,env} = \sqrt{\frac{2}{T_{env}} \sum_{i=0}^{T_{env}} V(t)_{env,cort,filt}^2} \quad (9)$$

$$V_{p,rec,tiempo} = \sqrt{2} \cdot V_{rms,rec} = \sqrt{\frac{2}{T_{env}} \sum_{t_{esperado}}^{T_{env}+t_{esperado}} V(t)_{rec,cort,filt}^2} \quad (10)$$

3.2 En frecuencia:

$$V_{p,env,freq} = \frac{2}{n_{env}} [TF\{V(t)_{env,cort}\}]_{f=f_{estudio}} \quad (11)$$

$$V_{p,rec,freq} = \frac{2}{n_{env}} [TF\{V(t)_{rec,cort}\}]_{f=f_{estudio}} \quad (12)$$

Nota: dado que se trabaja en tiempo discreto, n_{env} es el número de muestras de la señal en cuestión, es decir, $n_{env} = f_S \cdot T_{env}$, donde f_S es la frecuencia de muestreo.

3.3 En correlación:

$$V_{p,env,corr} = \frac{2}{n_{env}} \text{máx}[corr\{V(t)_{env,cort,filt}, V(t)_{env,cort,filt}\}] \quad (13)$$

$$V_{p,rec,corr} = \frac{2}{n_{env}} \text{máx}[corr\{V(t)_{rec,cort,filt}, V(t)_{env,cort,filt}\}] \quad (14)$$

4. Obtención de las presiones de pico que se obtendrían de las señales enviadas, para cada tono estudiado de frecuencia f , a la distancia d entre emisor-receptor, a partir de la sensibilidad del transductor emisor $TVR(f)$. Se realiza el cálculo para cada *método* de estudio (tiempo, frecuencia y correlación):

4.1 Presión teórica a 1[m]:

$$p_{p,1[m],método} = 10^{\frac{TVR(f)}{20}} \cdot V_{p,env,método} \quad (15)$$

4.2 Presión extrapolada a d [m]:

$$p_{p,d[m],método} = \frac{p_{p,1[m],método}}{d} e^{1-d} \quad (16)$$

5. Sensibilidad del piezoeléctrico receptor para cada frecuencia:

$$RVR_{método}(f) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{p,método}}{p_{p,d[m],método}} \right) \left[dB \text{ re } \frac{1V}{\mu Pa} \right] \quad (17)$$

V. Resultados

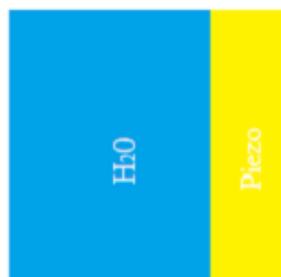
V.1 Resumen de las configuraciones realizadas

En un inicio se han realizado las medidas de impedancias de diferentes cerámicas, y a partir de esto, se ha proseguido con dos tipologías de piezoeléctricos para las próximas medidas. Una vez determinadas las características de las cerámicas se mecanizarán unos ML (capa de adaptación) de aluminio con diferentes medidas y espesores. De acuerdo al estudio anteriormente explicado. Y se medirán las diferentes impedancias y sensibilidades con las diferentes configuraciones. Primero libres y después pegados en la vasija.

Cerámicas libres				
ID	PIC	Espesor [mm]	Ø [mm]	ML [mm]
L1	PIC155	5	10	-
L2	PIC255	5	10	-
L3	PIC155	2	25	-
L4	PIC255	2	25	-

Cerámicas con ML				
ID	PIC	Espesor [mm]	Ø [mm]	ML [mm]
C1	Cilindro	5	10	7,7
C2	Cilindro	5	10	8,9
C3	Cilindro	5	10	16,1
C4	Cilindro	5	10	21,5
C5	Cilindro	5	10	23,8
C6	Cilindro	5	10	31,1
D1	Disco	2	25	15
D2	Disco	2	25	20
D3	Disco	2	25	25
D4	Disco	2	25	30

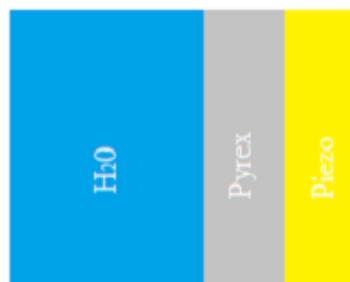
Configuración 1
cerámicas sueltas



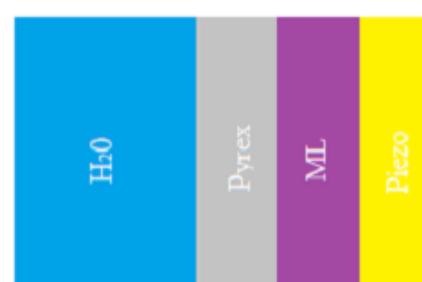
Configuración 2
cerámicas sueltas con matching layers



Configuración 3
cerámicas con matching layer pegadas a la vasija



*pegado sin ML



V.2 Ejemplo de una ficha de calibración

A continuación se muestra una de las fichas que se ha utilizada para la caracterización de cada una de las cerámicas en las distintas configuraciones. En el Anexo I se muestran todas las fichas de resultados. A partir de cada uno de estos resultados, se han elaborado las gráficas comparativas de los Apartados V.3, paso previo para validar los modelos teóricos en el Apartado V.4.

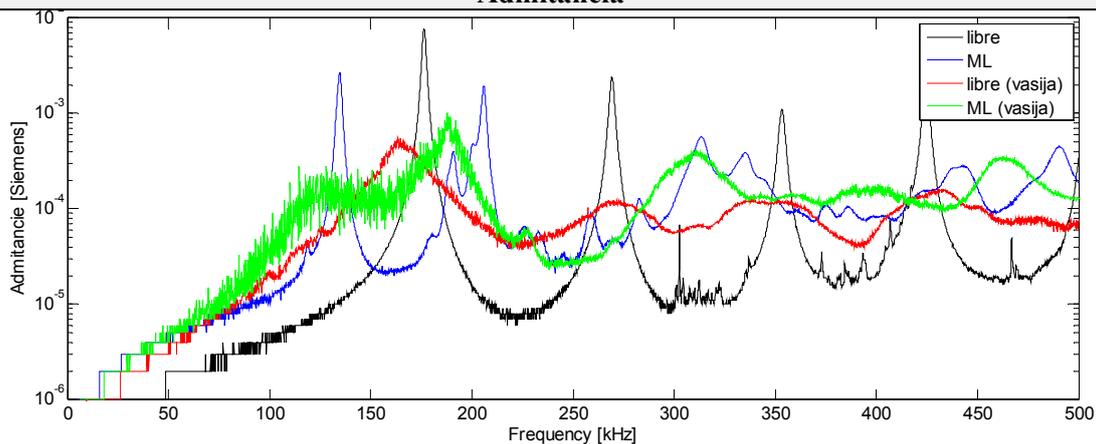
Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 7,7) "C1"



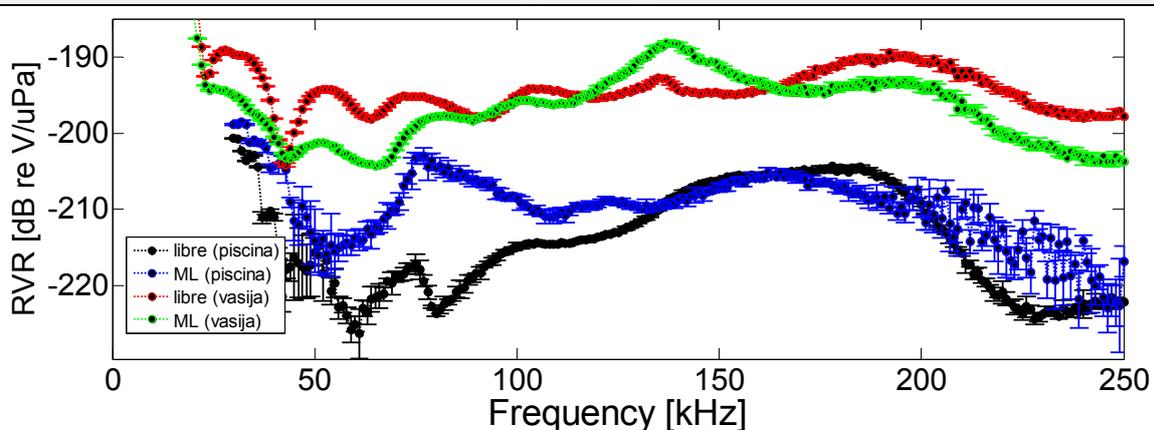
Características de los materiales

Elemento	c [m/s]	ro [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

V.3 Impedancia eléctrica de las distintas configuraciones

V.3.1 Tipología Cilindros $\phi 10$

Configuración 2: Piezo + ML

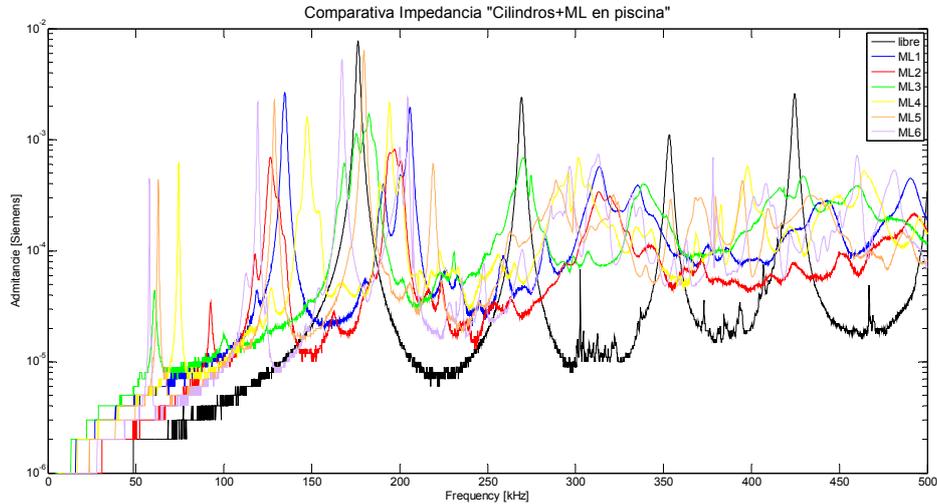


Fig. 32. Comparativa impedancia de los diferentes ML en piscina. Tipología $\phi 10$

Se observa que, cuanto mayor es el espesor del ML, menor es la frecuencia del primer máximo de admitancia, tal como se espera. Además, aparecen un mayor número de picos secundarios en el rango estudiado, así como un aumento general en los valores de admitancia.

Configuración 3: Piezo + ML + pyrex

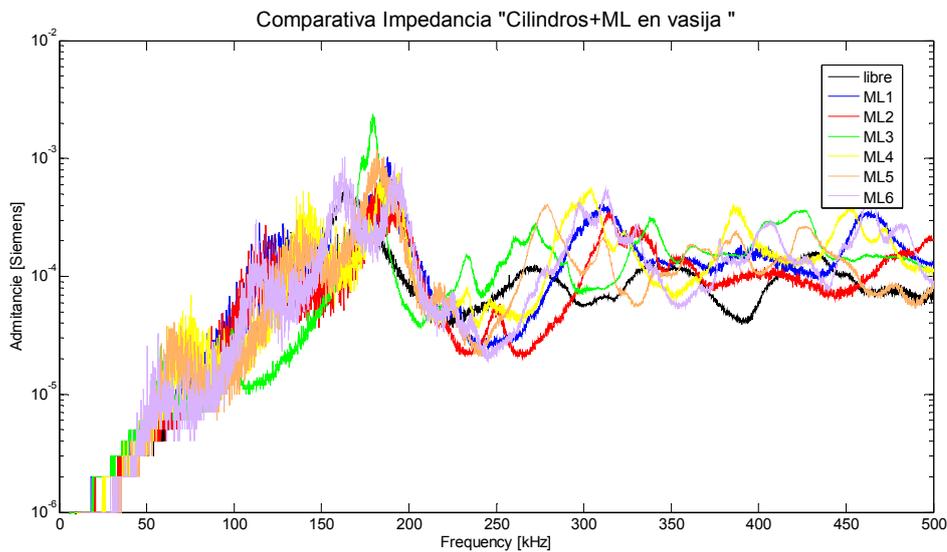


Fig. 33. Comparativa impedancia de los diferentes ML pegados a la vasija. Tipología $\phi 10$

El número de picos es similar al caso anterior, pero las frecuencias están ligeramente desplazadas hacia más bajas frecuencias y el ancho de cada uno de ellos es mayor.

V.3.2 Tipología Discos $\phi 25$

Configuración 2: Piezo + ML

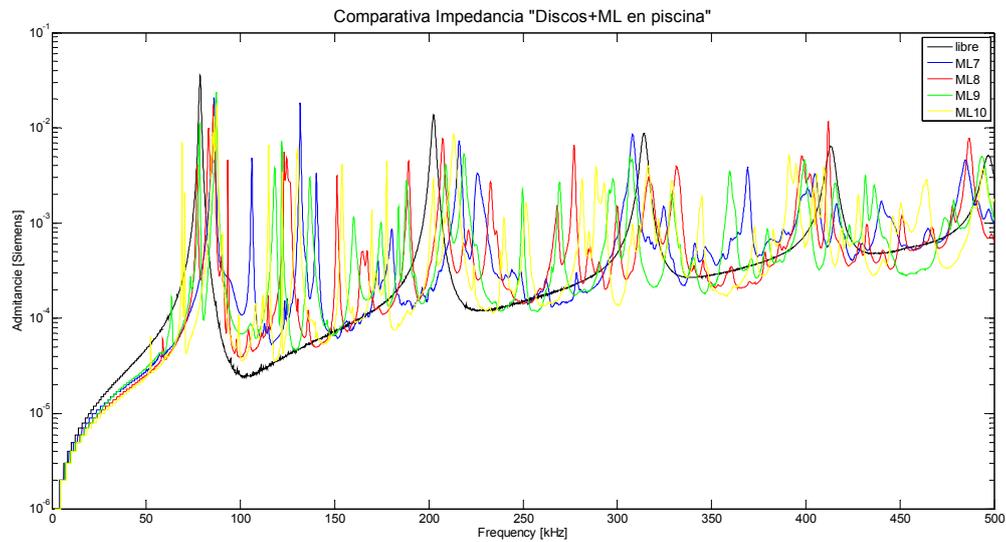


Fig. 34. Comparativa impedancia de los diferentes ML en piscina. Tipología $\phi 25$

Se aprecia claramente la frecuencia de resonancia radial en 90 kHz en todas las configuraciones, es decir, que la inclusión del ML no afecta excesivamente a dicho modo. Aun así, se observa cómo en función del espesor de los ML los picos se van desplazando a frecuencias inferiores. El valor de las admitancias es similar en todos los casos.

Configuración 3: Piezo + ML + pyrex

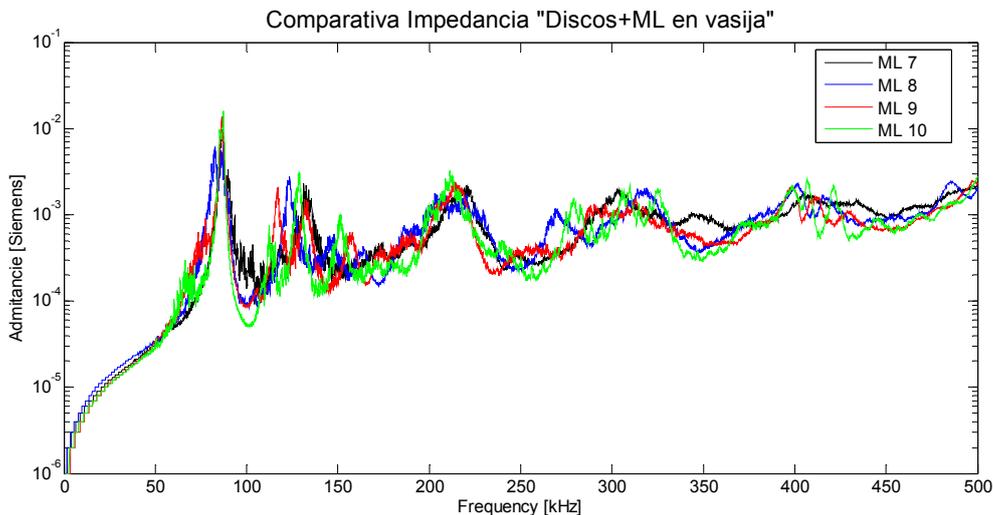


Fig. 35. Comparativa impedancia de los diferentes ML pegados a la vasija. Tipología $\phi 25$

Igual que en la anterior, se ve cómo el pico frecuencial del modo radial prevalece en todos los casos, desplazándose ligeramente a frecuencias inferiores.

V.4 Sensibilidad de las distintas configuraciones

V.4.1 Tipología Cilindros $\phi 10$

Configuración 2: Piezo + ML

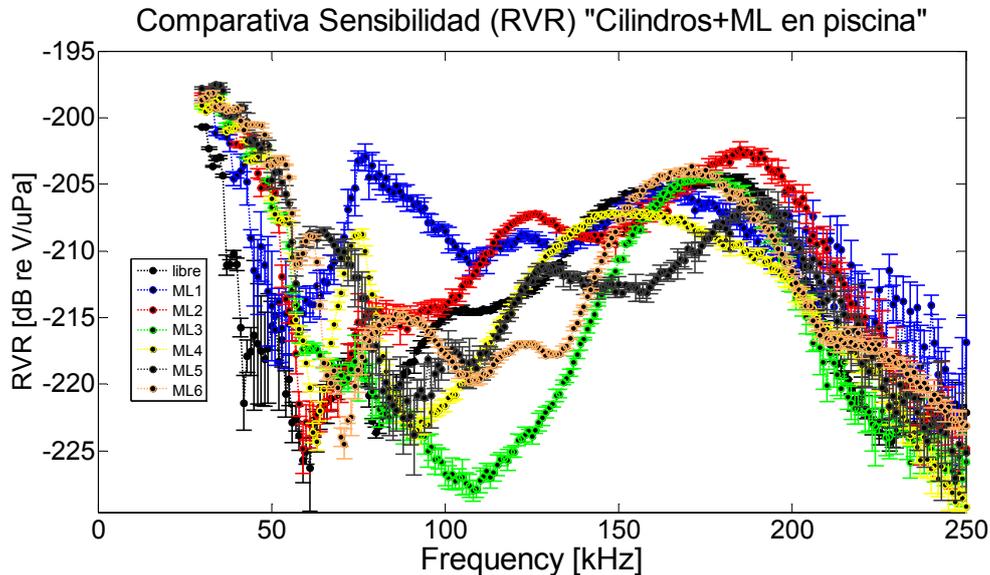


Fig. 36. Comparativa sensibilidad de los diferentes ML en piscina. Tipología $\phi 10$

Se observa cómo la sensibilidad aumenta en prácticamente todos los ML en el ancho de banda de 50 a 140 kHz, en especial el ML1 y 2. Aparecen en general picos a más bajas frecuencias.

Configuración 3: Piezo + ML + pyrex

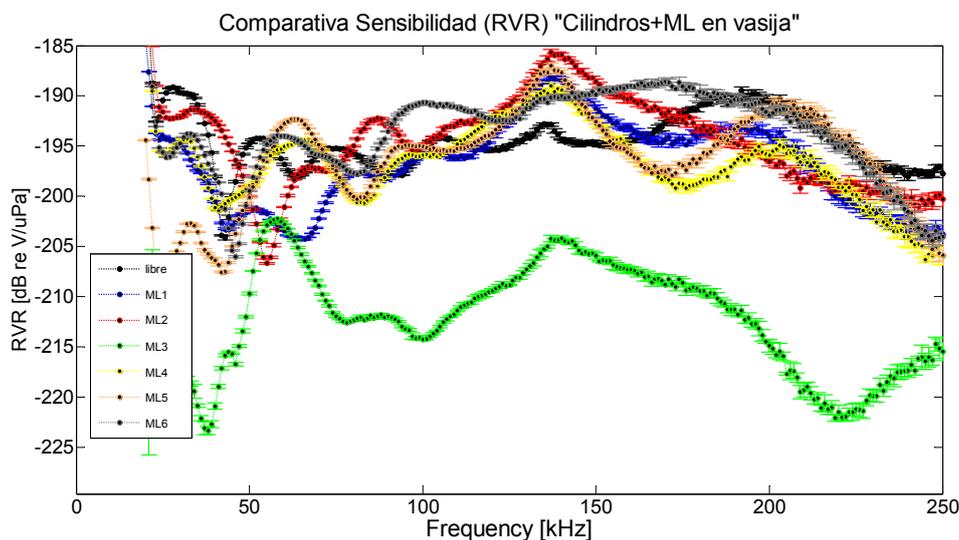


Fig. 37. Comparativa sensibilidad de los diferentes ML en vasija. Tipología $\phi 10$

En general, las sensibilidades en el caso de la vasija presentan un comportamiento más plano que en las medidas con ML únicamente. A excepción del ML3, el resto de ML mejoran la sensibilidad entre 60 y 180 kHz. Se debe tener en cuenta que a más bajas frecuencias resulta difícil calibrar los sensores sin solapamiento de las reflexiones.

V.4.2 Tipología Discos ø25

Configuración 2: Piezo + ML

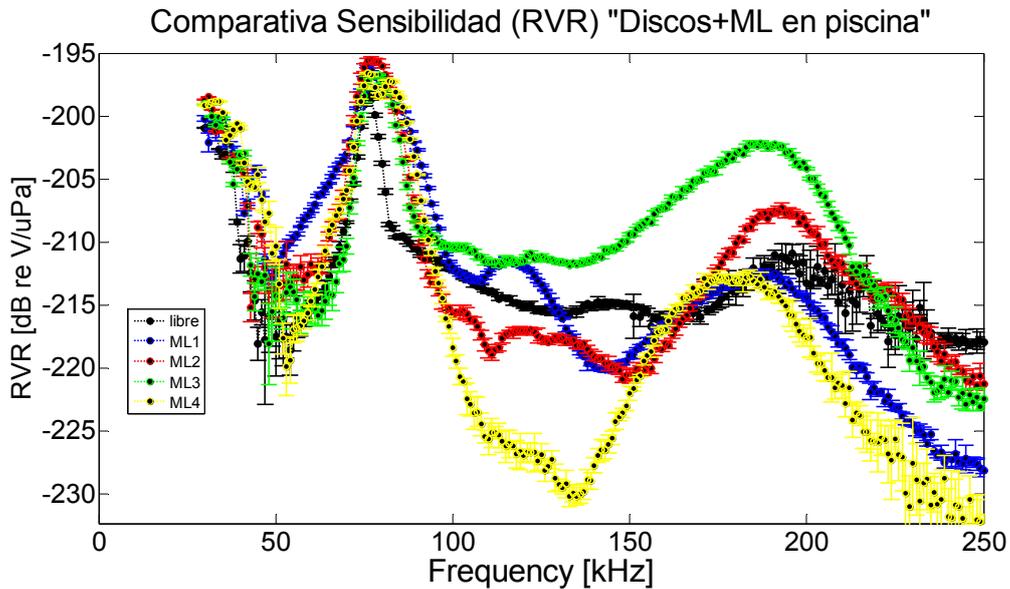


Fig. 38. Comparativa sensibilidad de los diferentes ML en piscina. Tipología ø25

De forma semejante a la admitancia, se ve cómo el pico frecuencial del modo radial prevalece en todos los casos. Aun así, para más bajas frecuencias, la mayoría cerámicas aumentan su sensibilidad, mientras que para frecuencias mayores, sólo el ML 3 presenta una mayor sensibilidad en todo el espectro. Por su parte, el ML1 y 2 mejoran la sensibilidad en 120-140 kHz y 180-210 kHz respectivamente.

Configuración 3: Piezo + ML + pyrex

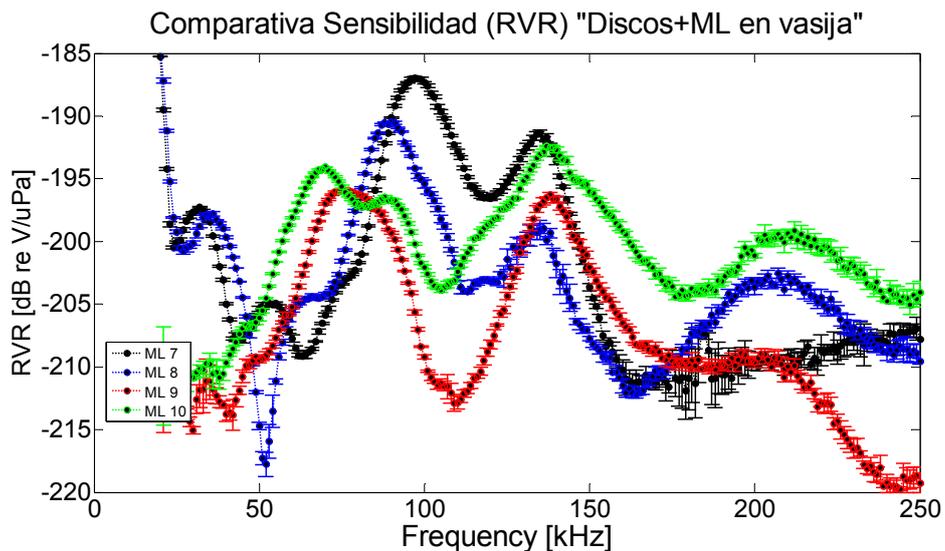


Fig. 39. Comparativa sensibilidad de los diferentes ML en vasija. Tipología ø25

El este caso, la sensibilidad mejora básicamente en todo el espectro para todos los transductores. El pico radial (90 kHz) está menos marcado siendo más ancho, y aparecen picos en frecuencias superiores (140 kHz y 200 kHz).

V.5 Validación del modelo multicapa

V.5.1 Modelo de una capa

Una vez obtenidas las sensibilidades de todas las cerámicas de cada una de las configuraciones, se pueden aunar los resultados mostrando la posición de los máximos de sensibilidad en función de los espesores de ML que se han estudiado, y contrastar los resultados con el valor obtenido teóricamente mediante el modelo de una capa comentado en el Apartado II.3.1, expresión (1), tal como se muestra en la Figura 40.

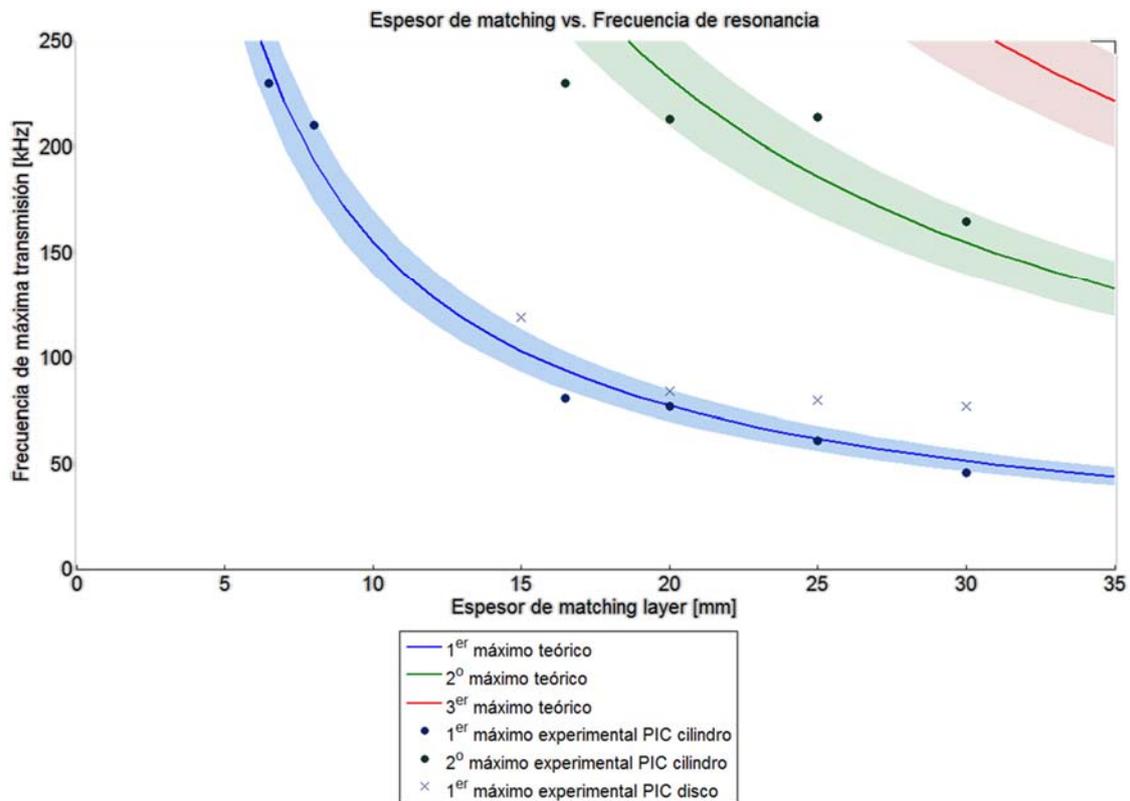


Fig. 40. Frecuencias de máxima transmisión acústica vs. espesor de la capa intermedia de aluminio según el Modelo de transmisión unicapa teórico. Contraste con frecuencias de máxima sensibilidad (RVR) para los distintos ML que se han estudiado experimentales.

Resultados teóricos:

- La línea azul oscuro expresa la frecuencia del primer máximo de transmisión para cada espesor dado utilizando para hacer el cálculo el valor representativo de las impedancias de los materiales caracterizados en el Apartado IV.2. La desviación de dichos valores medidos se ha tenido en cuenta mediante la sombra azul claro.
- La línea y el sombreado verdes muestran, de forma similar, la frecuencia del segundo máximo de transmisión, es decir, la segunda frecuencia que más se transmite.
- La línea y sombreado rojo dan cuenta del tercer máximo frecuencial de más se transmite.

Resultados experimentales:

- Los círculos muestran las frecuencias de máxima sensibilidad que se obtienen en cada uno de los espesores de ML de aluminio caracterizados para el caso de las **cerámicas cilindro**. Como se ve, para el primer máximo frecuencial, los resultados se aproximan bastante bien a los valores esperados, con desviaciones inferiores al 5 % respecto a la curva teórica. En el caso del segundo máximo frecuencial, aunque se trata de cada vez frecuencias más elevadas y de menor interés para nuestros propósitos, la dispersión de los valores es mayor pero se puede apreciar cierta tendencia de los datos con respecto a la curva teórica.
- Las cruces representan las frecuencias de máxima sensibilidad que se obtienen en cada uno de los espesores de ML de aluminio caracterizados para el caso de las **cerámicas tipo disco**. En este caso las primeras resonancias son en general un poco mayores al valor esperado y la tendencia no es tan clara como en el caso anterior. Esto puede deberse a que las máximas frecuencias esperadas están próximas a la frecuencia de resonancia de la cerámica libre, por lo que es más difícil de discernir un aumento en su proximidades. Aun así, existe un aumento de la transmisión acústica en estas frecuencias, que mejora la sensibilidad de estos transductores en estas bajas frecuencias, de mayor interés.

V.5.2 Modelo de dos capas

De forma similar al apartado anterior, se puede comparar el modelo teórico de dos capas comentado en el Apartado II.3.2 con las medidas experimentales de las cerámicas con ML de aluminio pegadas a la vasija de pyrex. El resultado se muestra en la Figura 41.

Resultados teóricos:

- Siguiendo el mismo esquema de colores es la misma que en el modelo unicapa (azul-1er máximo, verde-2º máximo, rojo-3er máximo), se ve que la incorporación de la capa de 3 mm de pyrex afecta sobretodo a los ML de tamaños pequeños, reduciendo las frecuencias de máxima transmisión. Es decir, para el mismo espesor de ML se tiene ahora menores frecuencias de resonancia que en el caso con solamente ML. Esto era de esperar dado que se está añadiendo masa, y tamaño al sistema.
- Para partir de 20 mm de espesor de ML, el efecto del cristal pyrex es prácticamente despreciable.

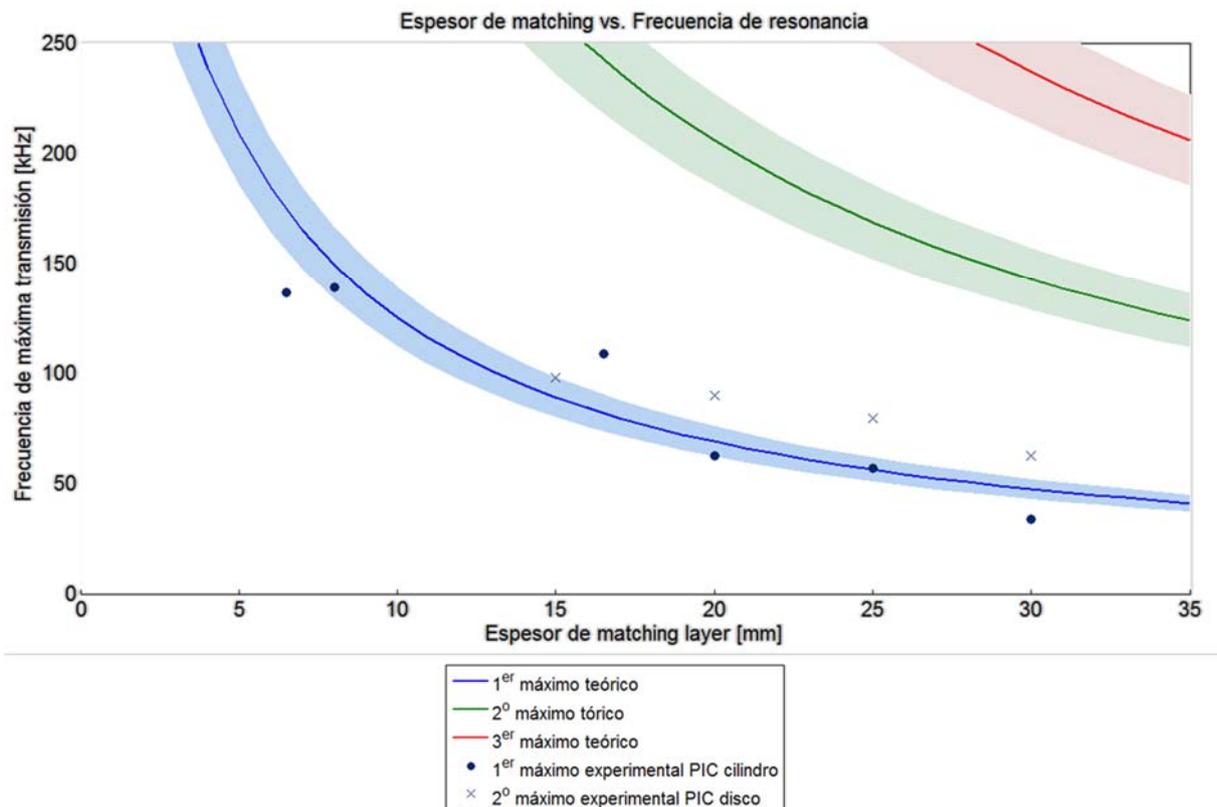


Fig. 41. Frecuencias de máxima transmisión acústica vs. espesor de la capa intermedia de aluminio según el Modelo de transmisión bicapa teórico, considerando una segunda capa de 2.2 mm de espesor de pyrex. Contraste con frecuencias de máxima sensibilidad (RVR) para los distintos ML pegados a la vasija que se han estudiado experimentales.

Resultados experimentales:

- En general, se han obtenido picos en frecuencias menores a las registradas con únicamente el ML a pesar de que el comportamiento de la sensibilidad no ha sido tan claro en todos los casos, es decir, los picos no eran tan prominentes como en el caso anterior.
- En el caso de las cerámicas cilindro (círculos), los resultados se acercan al modelo teórico aunque algunos valores se desvían un poco como es el caso del ML de 7,7 mm i del 16,1 mm. Aun así, sí se puede observar una tendencia similar a la esperada.
- En el caso de las cerámicas disco (cruces), las frecuencias siguen siendo de nuevo mayores a las esperadas pero sí se observa cierto aumento frecuencial para espesores menores, tal como se espera.

VI. Conclusiones

Nos estamos acercando a entender cómo funciona la transmisión acústica entre diversos medios con una configuración como la dispuesta en los detectores de partículas tipo PICO. Por un lado, la incorporación de ML de aluminio ha conseguido el aumento en ciertas frecuencias de interés, variable según la cerámica, ML y configuración. Por su parte, los modelos teóricos empleados se han aproximado bastante bien a los resultados experimentales, a pesar de los problemas intrínsecos en las medidas (reducidas distancias E-R, incertidumbres de medida, etc.). Destacamos, las siguientes conclusiones particulares:

Impedancia:

- En el caso de los cilindros, la incorporación de ML desplaza el primer máximo frecuencia de admitancia hacia frecuencias inferiores, como era de esperar, coincidiendo en algunos casos con el aumento de sensibilidad.
- En el caso de los discos, se mantienen los picos en las frecuencias radiales, cualquiera que sea el ML. El resto de picos frecuenciales se desplazan ligeramente a frecuencias inferiores, debido al aumento de la masa.
- Para más bajas frecuencias que el primer pico de admitancia, a pesar de que la admitancia tiende a disminuir, la sensibilidad no sigue dicho patrón sino que, en la mayoría de los casos, tiende a aumentar, sobre todo al incorporar ML.

Sensibilidad:

- La incorporación de ML, además de desplazar ligeramente la posición de los máximos hacia más bajas frecuencias, da lugar a un ensanchamiento de los picos y, en general, a un aplanamiento de la curva de sensibilidad para el rango frecuencial estudiado.
- En general, las sensibilidades aumentan (entre 10 y 20 dB) en la configuración 3 (agua+pyrex+ml+piezo) respecto a la configuración 2 (agua+ml+piezo), lo cual es una ganancia intrínseca de la configuración.
- Además, comparando entre las cerámicas pegadas a vasija con ML y sin él, vemos que aparecen ciertos máximos de sensibilidad (entre 5 y 10 dB) tanto en bajas como en altas frecuencias, según el ML.

- En cuanto al análisis individual de cada ML se observa que, pegados a la vasija, los cilindros que mayor sensibilidad presentan (más sensibilidad en todo el rango frecuencial en estudio) son los C1, C2 y C6; mientras que en el caso de los discos, el D3 y D4.

Validación del modelo teórico:

- En el caso de una capa de adaptación, el modelo teórico aproxima bastante bien los resultados a las medidas experimentales, sobretodo en el caso de los cilindros, llegando a predecir el comportamiento del segundo máximo, aunque con menor precisión. En el caso de los discos, el modelo no se comporta tan fielmente pero sí sigue la tendencia predicha.
- En el caso de dos capas de adaptación, dado que las sensibilidades son más llanas en general, resulta más difícil discernir los picos. Aun así, existen una serie de máximos que se corresponden bastante bien al modelo teórico.

Futuras líneas de investigación:

- Medición y calibración de la señal acústica generada por el crecimiento de una burbuja al ubicar los transductores en una cámara convenientemente diseñada para detectar partículas.
- Seguir en el desarrollo teórico y validación experimental del modelo analítico de transmisión acústica para más de dos capas.
- Simulación mediante elementos finitos de cada una de las configuraciones experimentales estudiadas en este trabajo para validar dicha herramienta de simulación y poseer un método de diseño predictivo de transductores.
- Diseño de un transductor específico, con una cerámica y ML adecuado, pero teniendo en cuenta el encapsulamiento y una posible capa trasera (backing).

VII. Bibliografía

- [1] L.E.Kinsler, *Fundamentals of acoustics*. 4ed, John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [2] T.D.Roosing, *Springer Handbook of acoustics*. Rossing, 2007
- [3] M.Hamilton, D. Blackstock. *Nonlinear acoustics*. New York: Academic Press, 1998.
- [4] Bass, Blackstock, *Atmospheric Absorption of sound*. JASA 97, 1995.
- [5] I. Felis Enguix, *Estudio del efecto paramétrico en aire y de los efectos de interponer una capa de material tras el transductor*. UPV TFM 2012
- [6] J. Alba, *Algoritmos de modelado de particiones multicapa para la predicción de su aislamiento acústico a ruido aéreo*. Memoria De Tesis Doctoral 2000
- [7] C.Amole, M.Ardid, D.M.Asner, D.Baxter, E.Behnke, P.Bhattacharjee, *Dark Matter Search Results from the PICO-2L C3F8 Bubble Chamber*, Physical Review Letters, 2015
- [8] S.Adrián, M.Ardid, M.Bou, I.Felis, C.D.Llorens, J.A.Martínez, M.Saldaña, *Acoustic signal detection through the cross-correlation method in experiments with different signal to noise ratio and reverberation conditions*, Ad-hoc Networks and Wireless, pp.66-79, 2015
- [9] M.Ardid, M.Bou-Cabo, I.Felis, J.A.Martínez-Mora *MOSCAB: Direct dark matter search using the Geyser technique Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, ...*, 2014
- [10] M.Bou, I.Felis, M.Ardid, *Acoustic studies for alpha background rejection in dark matter bubble chambers detectors. Low Radioactivity Techniques*, 2013
- [11] M.Bou, M.Ardid, I.Felis, *PICO and MOSCAB: Dark Matter searches using superheated liquids*, Red Nacional Temática de Astropartículas (RENATA), (Canfranc), 2014
- [12] A.Albiol y A.Girona, *Apuntes de teoría de la señal*. Ed.UPV, ref: 2001.1687.
- [13] J.Ramis, J.A.Martínez, A.Uris y J.Alba, *Prácticas de transductores*. Ed. UPV, ref: 97.028.

- [14] Antonio Arnau, *Piezoelectric transducers and other applications*
- [15] W. P.Mason and H. J. Mckimin, *Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in MetMs and Glasses*. 1947
- [16] M. A. Breazeale, *Attenuation and the Nonlinear Behavior of Solids*. National Center for Physical Acoustics. University of Mississippi
- [17] Vincent Phong and Dimitri Papamoschou, *High frequency acoustic transmission loss of perforated plates at normal incidence*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, 2013
- [18] Kino Gordon, *Acoustic Waves Devices Imaging*. 2000
- [19] Cheeke D, *Fundamentals And Applications Of Ultrasonic Waves*. 2002
- [20] E. Mosland, “*Reciprocity calibration method for ultrasonic piezoelectric transducers in air*.”. Department of Physics and Technology, University of Bergen, Norway 2013.
- [21] Dunn I. P., Davern W. A., *Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers*. Applied Acoustics 19, 1986.
- [22] A. Beléndez, *Acústica, Fluidos y Termodinámica*. E.U.Politécnica d’Alacant, 1992
- [23] M.Bou, M.Ardid, I.Felis. *Electromechanical optimization techniques for COUPP 500 acoustic sensors*. 9th Multidark Consolider Workshop. Universidad de Alcalá de Henares (Madrid). Nov.2013.

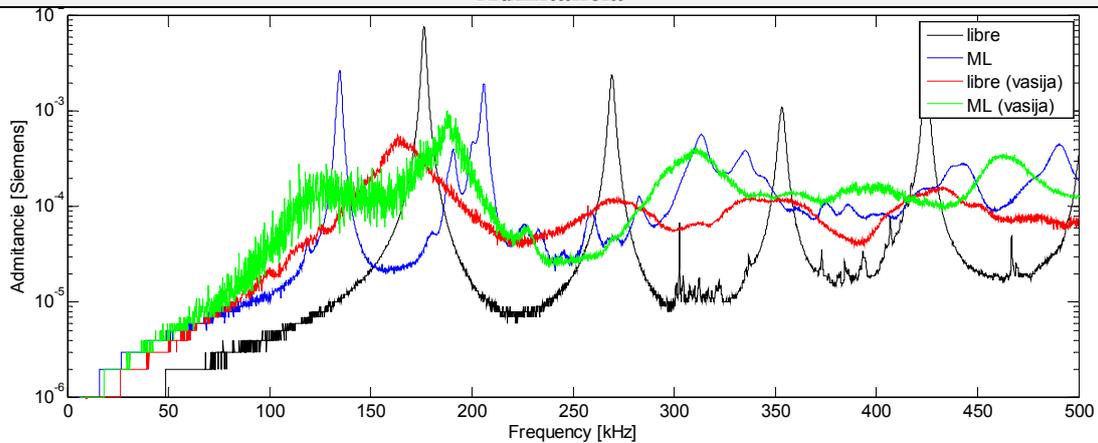
Anexo I. Fichas de calibración

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 7,7) "C1"

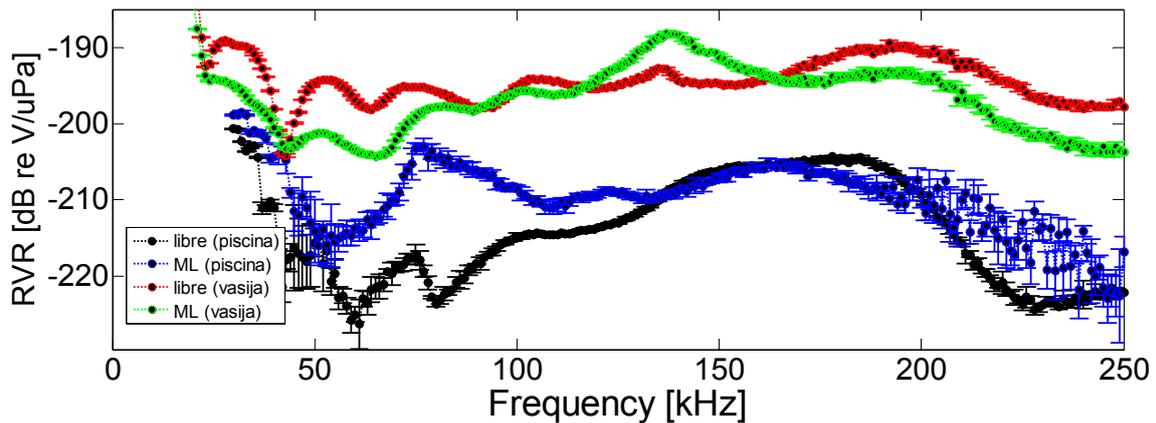


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ro [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad

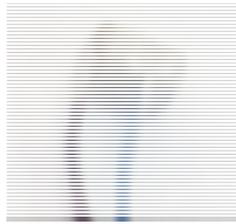


Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

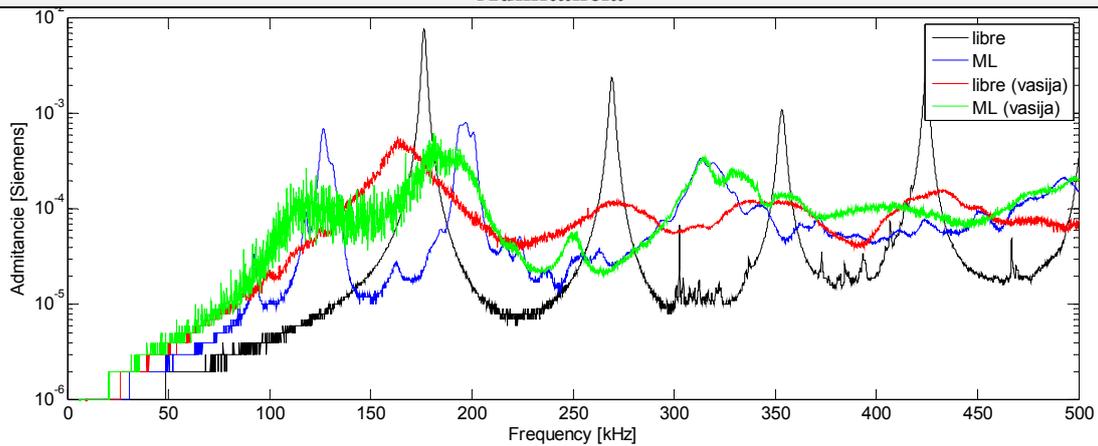
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 8,9mm) "C2"

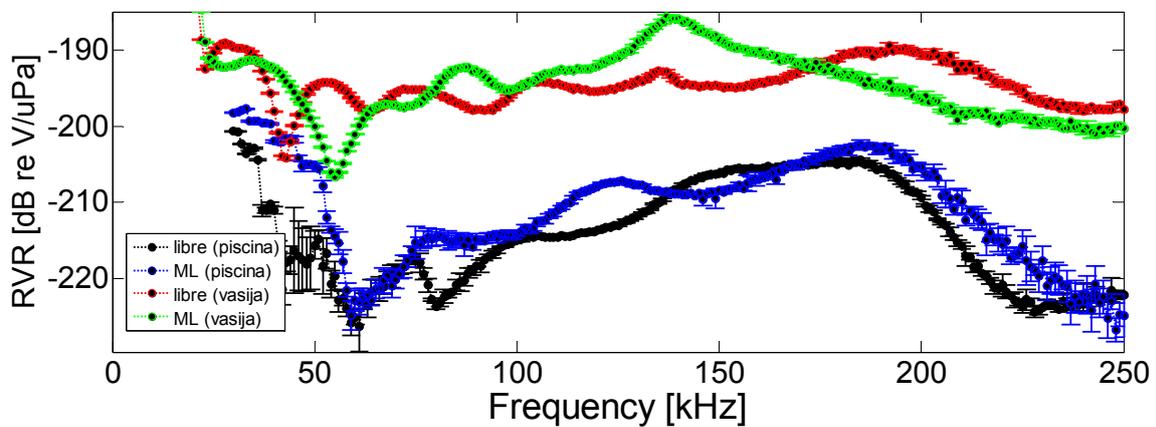


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

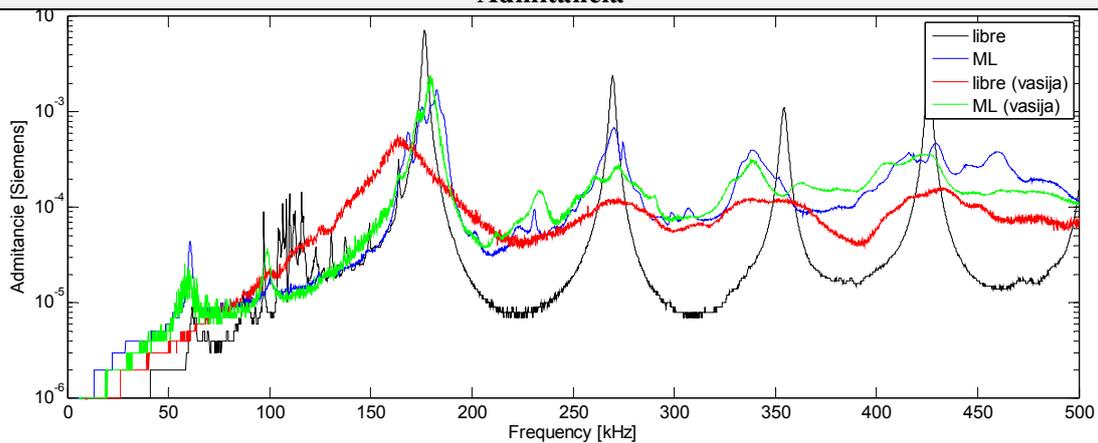
Además de la toma de datos se ha realizado un procesamiento de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 16,1mm) “C3”

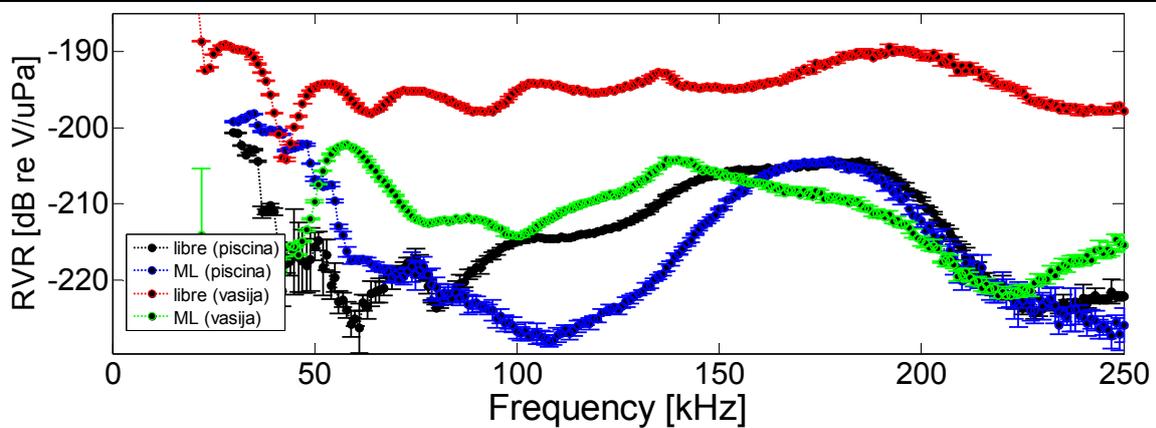


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

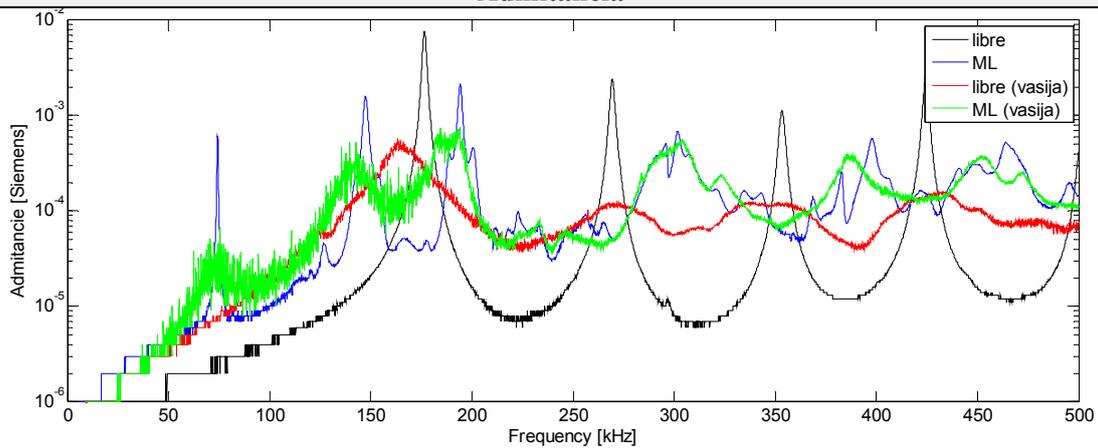
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 21,5) "C4"

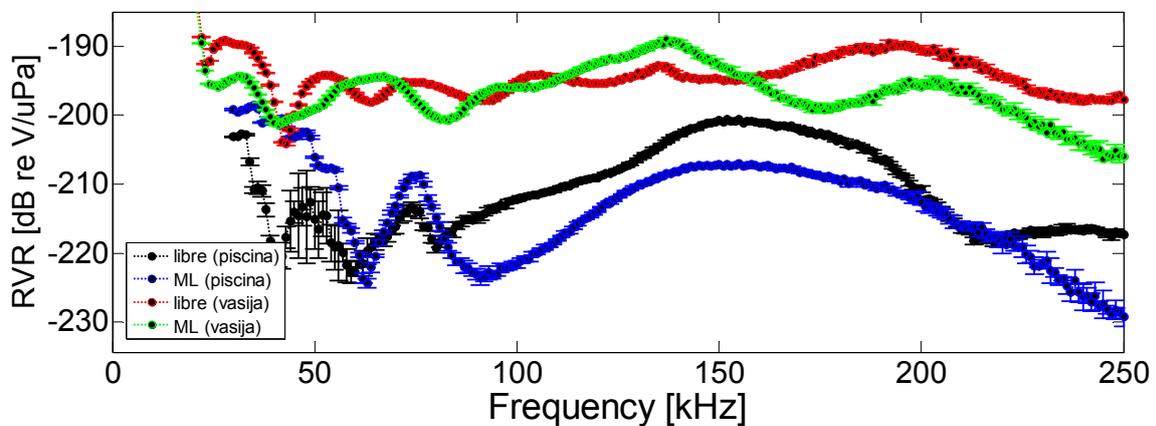


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad

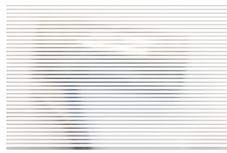


Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

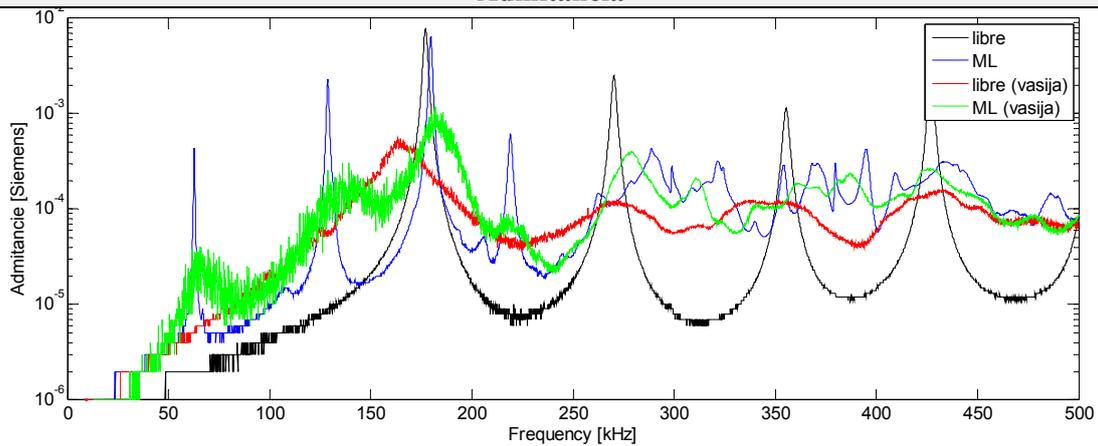
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 23,8mm) "C5"

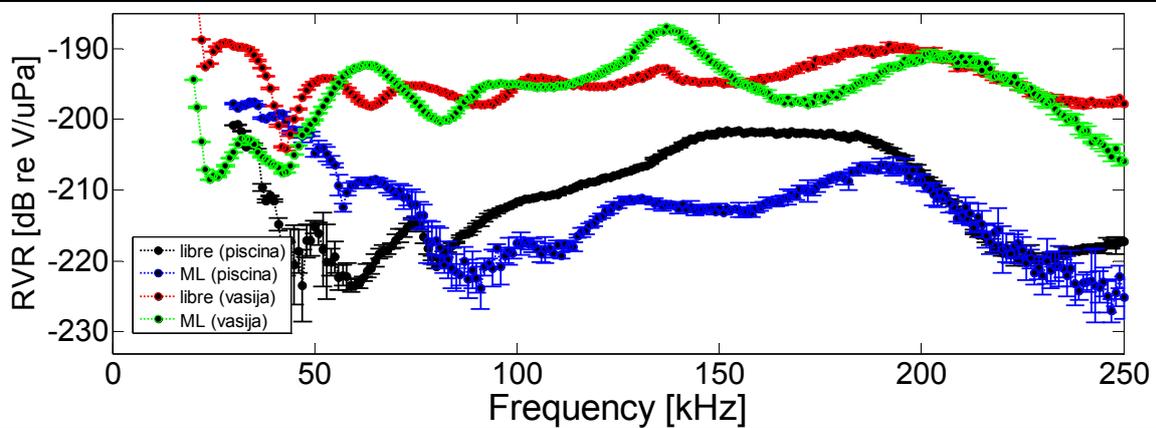


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

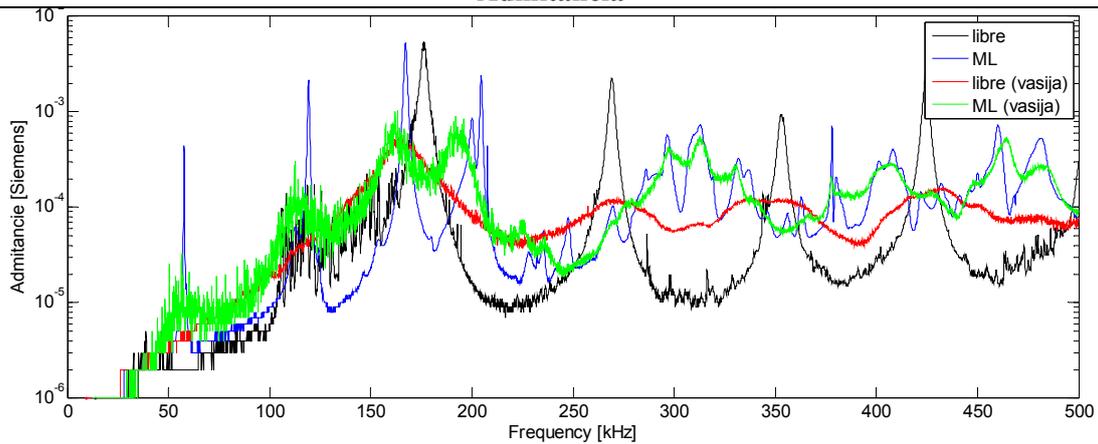
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø10mm/esp5mm) + ML (Al 31,1mm) "C6"

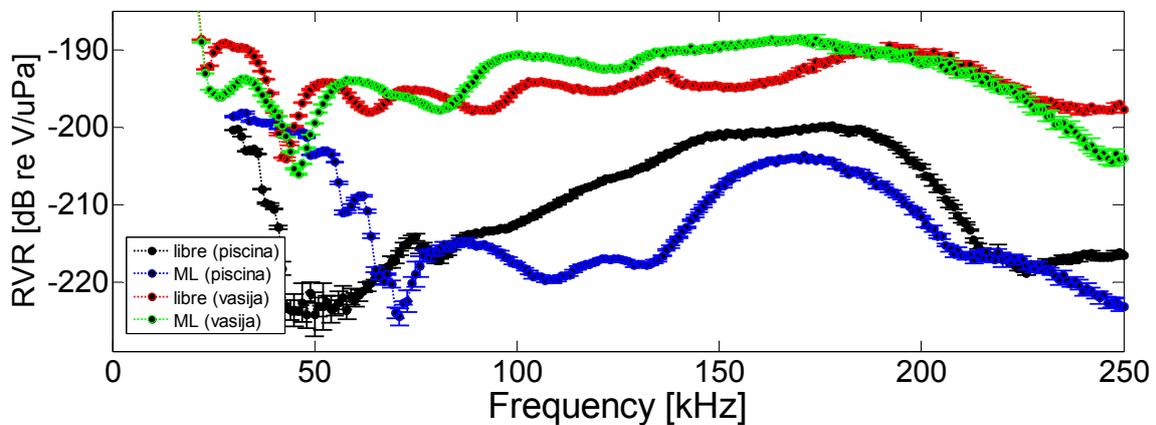


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad

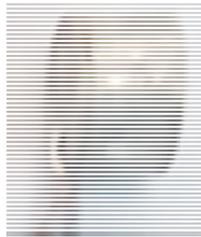


Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

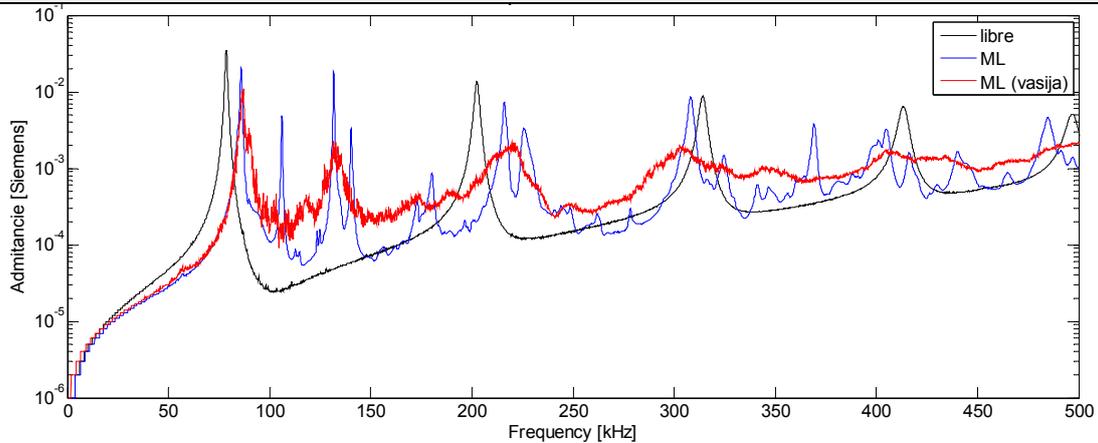
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø25mm/esp5mm) + ML (Al 15mm) "D1"

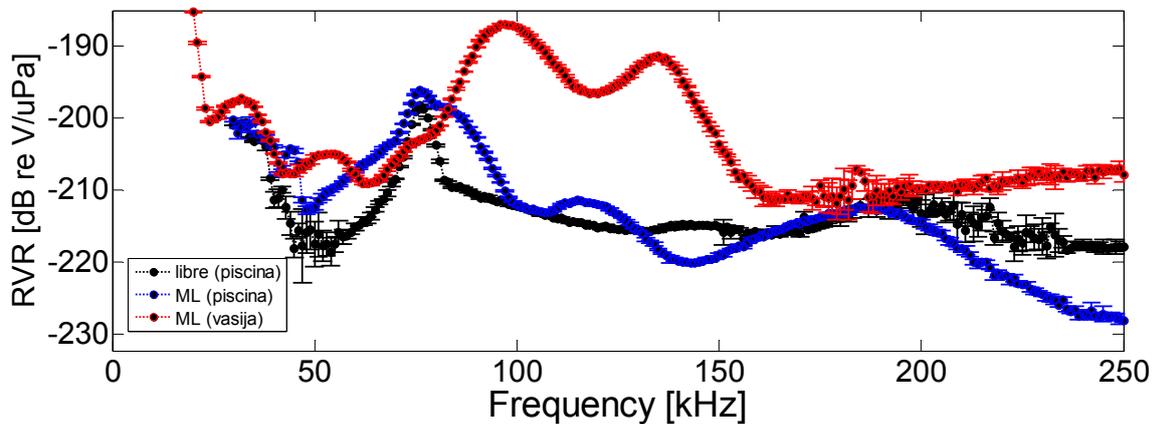


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ro [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



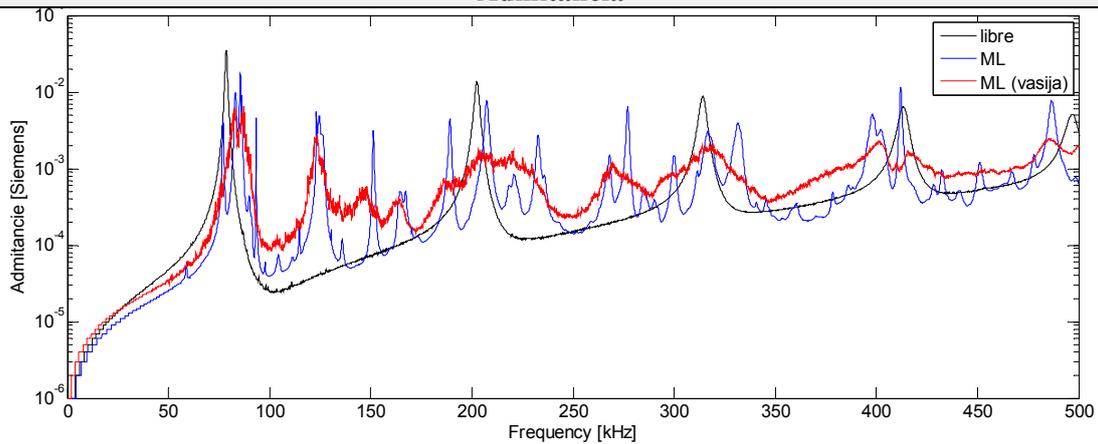
Observaciones	Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.
	Además de la toma de datos se ha realizado un procesamiento de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø25mm/esp5mm) + ML (Al 20mm) "D2"

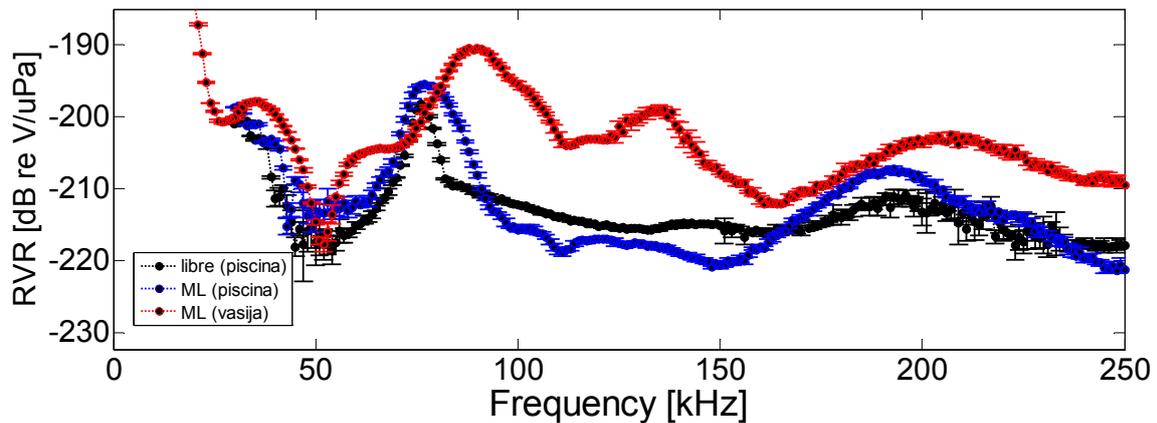


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad

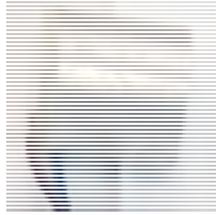


Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

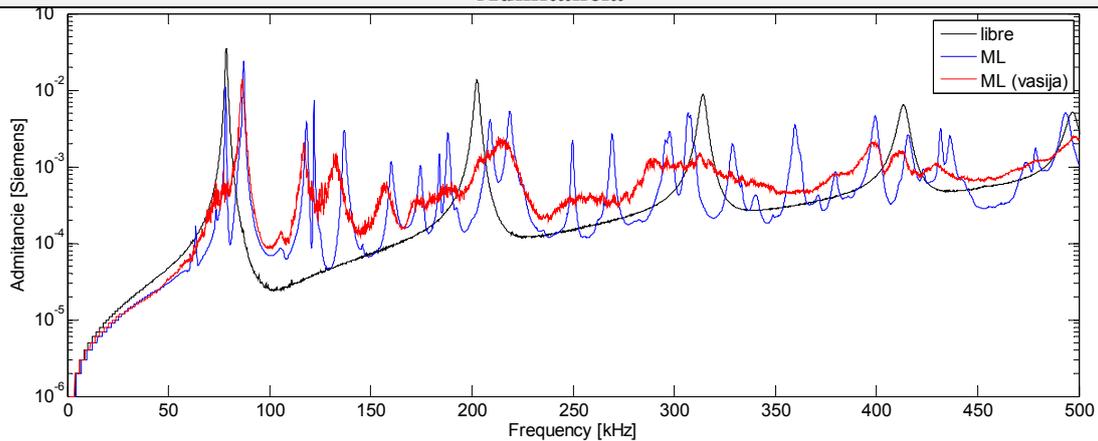
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø25mm/esp5mm) + ML (Al 25mm) "D3"

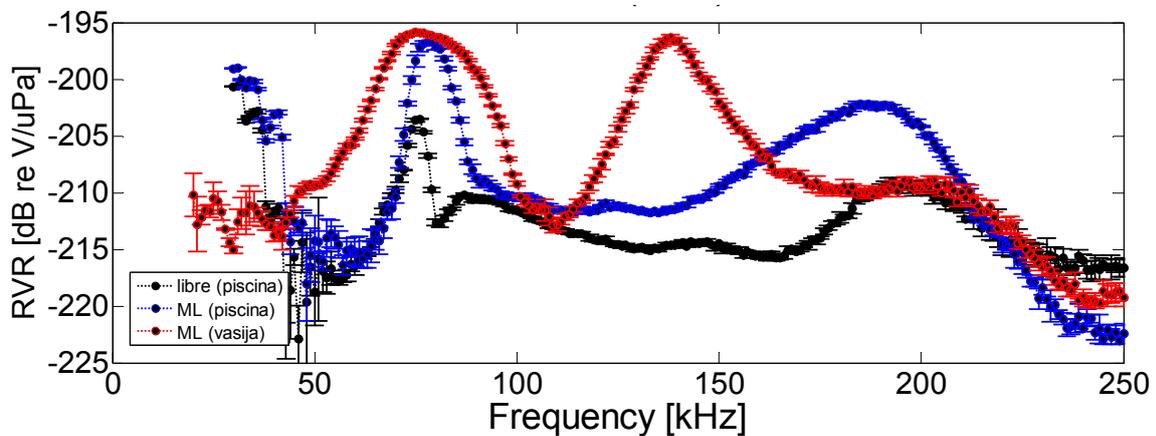


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

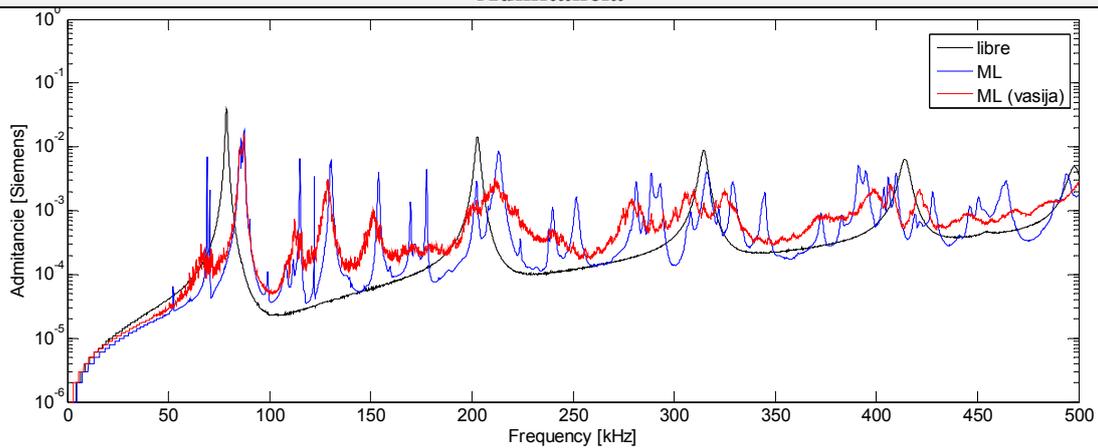
Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Transductor PIC255 (ø25mm/esp5mm) + ML (Al 30mm) "D4"

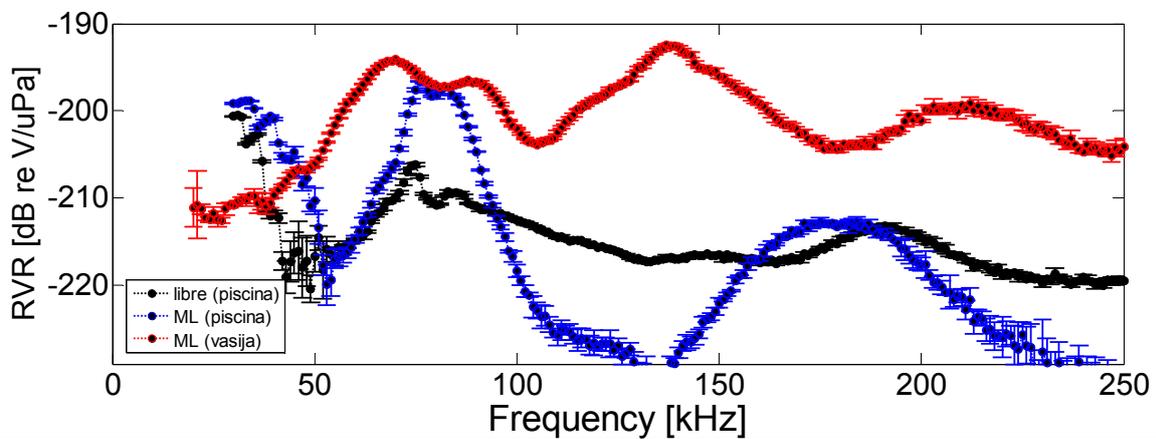


Características de los materiales			
Elemento	c [m/s]	ρ _o [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Pyrex	4939,5	2230	11,01
Adhesivo	-	-	-
ML Aluminio	6335,2	2747,6	17,41
PIC 255	2381,0	7719	18,37

Admitancia



Sensibilidad



Observaciones

Las especificaciones de los procedimientos para la realización de las medidas están reflejadas anteriormente.

Además de la toma de datos se ha realizado un procesado de datos para filtrar, y poder realizar los gráficos y comparativas mediante Matlab.

Anexo II: Relación de medidas realizadas

Señales enviadas		
ID	Tipo	Medida
senimp	Senoidal	Impedancia
Sensens	Senoidal	Sensibilidad

Medidas impedancia									
	ID	Cerámica	ML	Pyrex	N° mesures	Fini [kHz]	Ffin [kHz]	Pasos [kHz]	Mesures total
Cerámicas libres	1	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	2	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	3	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	4	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	5	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	6	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	7	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	8	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	9	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	10	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
Cerámicas + ML	1	10mm	-	7,7	5	1	250	1	1000
	2	10mm	-	8,9	5	1	250	1	1000
	3	10mm	-	16,1	5	1	250	1	1000
	4	10mm	-	21,5	5	1	250	1	1000
	5	10mm	-	23,8	5	1	250	1	1000
	6	10mm	-	31,1	5	1	250	1	1000
	7	25mm	-	15	5	1	250	1	1000
	8	25mm	-	20	5	1	250	1	1000
	9	25mm	-	25	5	1	250	1	1000
	10	25mm	-	30	5	1	250	1	1000
Cerámicas + ML + Pyrex	1	10mm	-	7,7	5	1	250	1	1000
	2	10mm	-	8,9	5	1	250	1	1000
	3	10mm	-	16,1	5	1	250	1	1000
	4	10mm	-	21,5	5	1	250	1	1000
	5	10mm	-	23,8	5	1	250	1	1000
	6	10mm	-	31,1	5	1	250	1	1000
	7	25mm	-	15	5	1	250	1	1000
	8	25mm	-	20	5	1	250	1	1000
	9	25mm	-	25	5	1	250	1	1000
	10	25mm	-	30	5	1	250	1	1000

					Medidas Sensibilidad				
	Id	Cerámic	ML	Pyrex	Nº mesures	Fin [kHz]	Ffin [kHz]	Pasos [kHz]	Mesures total
Cerámicas libres en agua	1	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	2	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	3	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	4	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	5	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	6	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	7	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	8	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	9	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	10	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
Ruido Cerámicas libres en agua	1	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	2	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	3	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	4	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	5	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	6	10mm	-	-	5	1	250	1	1000
	7	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	8	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	9	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
	10	25mm	-	-	5	1	250	1	1000
Cerámicas + ML en agua	1	10mm	7,7	-	5	1	250	1	1000
	2	10mm	8,9	-	5	1	250	1	1000
	3	10mm	16,1	-	5	1	250	1	1000
	4	10mm	21,5	-	5	1	250	1	1000
	5	10mm	23,8	-	5	1	250	1	1000
	6	10mm	31,1	-	5	1	250	1	1000
	7	25mm	15	-	5	1	250	1	1000
	8	25mm	20	-	5	1	250	1	1000
	9	25mm	25	-	5	1	250	1	1000
	10	25mm	30	-	5	1	250	1	1000
Ruido Cerámicas + ML en agua	1	10mm	7,7	-	5	1	250	1	1000
	2	10mm	8,9	-	5	1	250	1	1000
	3	10mm	16,1	-	5	1	250	1	1000
	4	10mm	21,5	-	5	1	250	1	1000
	5	10mm	23,8	-	5	1	250	1	1000
	6	10mm	31,1	-	5	1	250	1	1000
	7	25mm	15	-	5	1	250	1	1000
	8	25mm	20	-	5	1	250	1	1000
	9	25mm	25	-	5	1	250	1	1000
	10	25mm	30	-	5	1	250	1	1000
Cerámicas + ML + Pyrex	1	10mm	7,7	X	5	1	250	1	1000
	2	10mm	8,9	X	5	1	250	1	1000
	3	10mm	16,1	X	5	1	250	1	1000
	4	10mm	21,5	X	5	1	250	1	1000
	5	10mm	23,8	X	5	1	250	1	1000
	6	10mm	31,1	X	5	1	250	1	1000
	7	25mm	15	X	5	1	250	1	1000
	8	25mm	20	X	5	1	250	1	1000

	9	25mm	25	X	5	1	250	1	1000
	10	25mm	30	X	5	1	250	1	1000
Ruido Cerámicas + MI. + Pyrex	1	10mm	7,7	X	5	1	250	1	1000
	2	10mm	8,9	X	5	1	250	1	1000
	3	10mm	16,1	X	5	1	250	1	1000
	4	10mm	21,5	X	5	1	250	1	1000
	5	10mm	23,8	X	5	1	250	1	1000
	6	10mm	31,1	X	5	1	250	1	1000
	7	25mm	15	X	5	1	250	1	1000
	8	25mm	20	X	5	1	250	1	1000
	9	25mm	25	X	5	1	250	1	1000
	10	25mm	30	X	5	1	250	1	1000

Medidas Eco-impulso				
ID	Material	Nº medidas	Tipo señal	Frec.
1	Aluminio	4	impulso	
2	Cristal pyrex	4	impulso	
3	Piezoeléctrico	4	impulso	

Anexos III: Scripts

Relación scripts utilizados:

Software	Nombre archivo	función
Labview	tdimpedancia.	Cargar, enviar y recibir señal
Matlab	pimpedancia.m	Procesado de datos y representación
LABwieh	tdsensibilidad.	Cargar, enviar y recibir señal
Matlab	psensibilidad.m	Procesado de datos y representación
MATlab	ecoimpulse.m	Procesado de datos

*Scripts diseñados y desarrollados en conjunto con el DFA-UPV

Visualización de los interfaces en la toma de datos

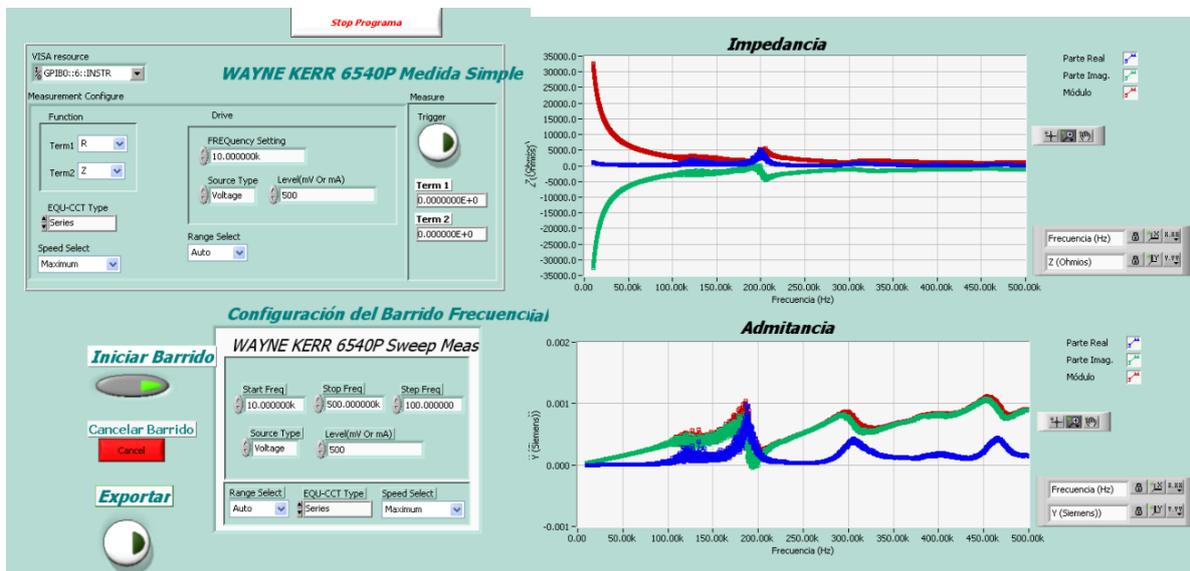


Fig. 42. Visualización del software impedancia

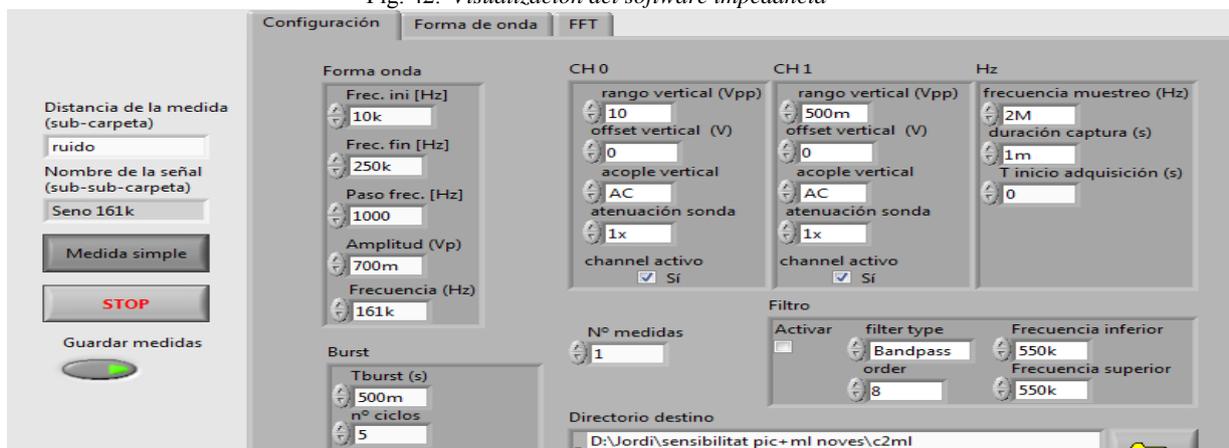


Fig. 43. Ejemplo interfaz sensibilidad

Optimización de la transmisión de señales acústicas utilizando diferentes configuraciones de matching layers con aplicación a cámaras de burbujas.

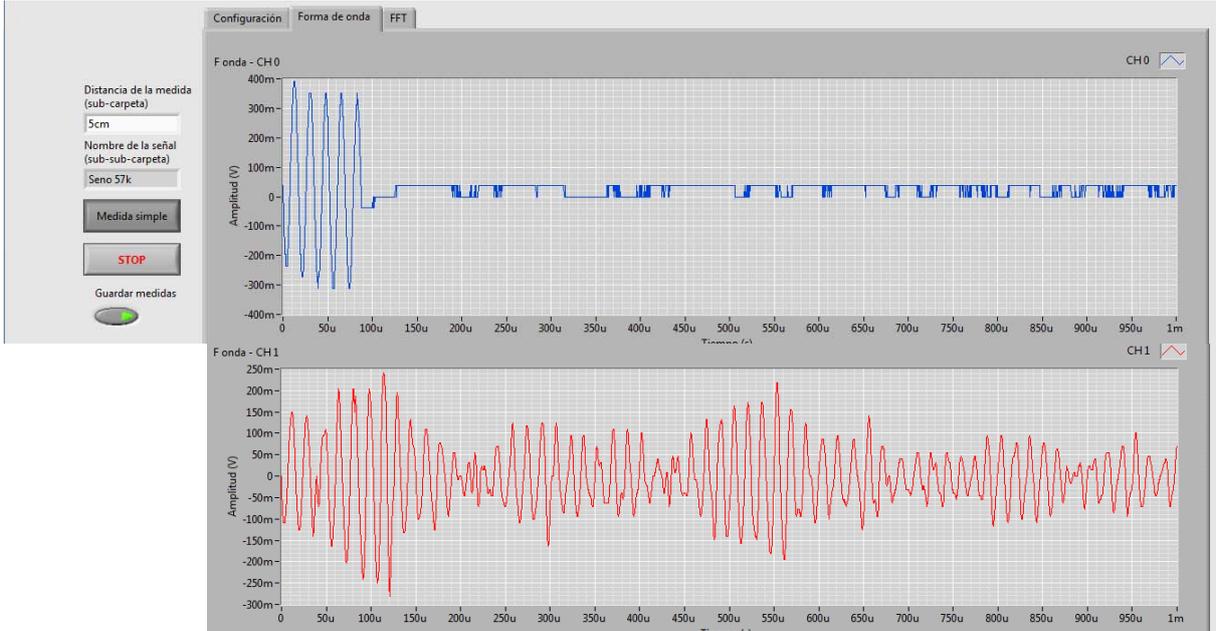
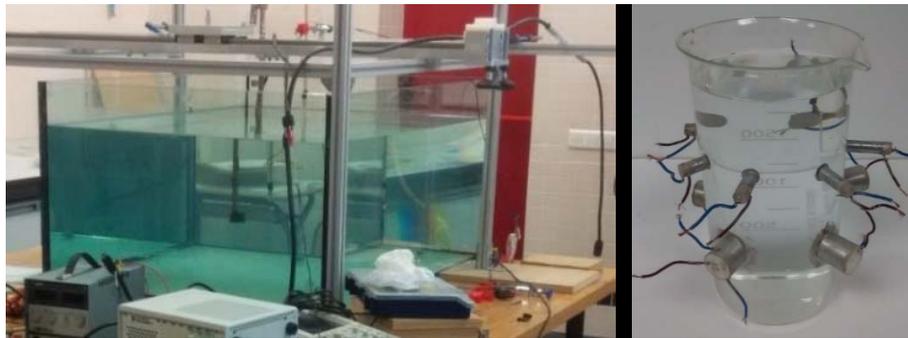


Fig. 44. Ejemplo de señal emitida y señal recibida

Anexo IV: Características materiales utilizados

Agua



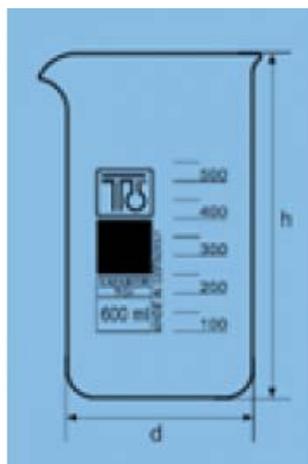
	Velocidad Propagación (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Mrayls)
H2O	1500	1000	1,5

Aluminio



	Velocidad Propagación (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Mrayls)
Aluminio	6335,2	2747,6	17,41

Pyrex



SKU	813.351021.500.003
TYPE AMPUL	Nee
NORM	DIN 12331
BREKMETHODODE	no break-ring
TYPE GLAS	borosilicate glass
BEDRUKKING	Nee
QTY EXPOBOX	10
CAPACITY	2000ml
CAPACITEIT	Nee
TYPE BODEM	Nee
TOTALE LENGTE (MM)	240
WANDDIKTE (MM)	Nee
DIAMETER (MM)	120

	Velocidad Propagación (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Mrayls)
Pyrex	4939,5	2230	11,01

Optimización de la transmisión de señales acústicas utilizando diferentes configuraciones de matching layers con aplicación a cámaras de burbujas.

Adhesivo



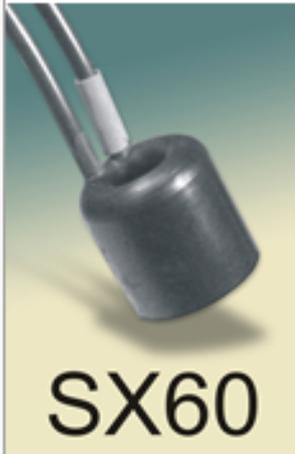
	Velocidad Propagación (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Mrays)
Adhesivo	-	-	-

Ficha técnica cerámica

	Velocidad Propagación (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Impedancia (Mrayls)	
PIC 255 (z2)	2381,0	7719	18,37	
Piezo Material type			PIC 255	PIC 155
Parameter				
Physical and Dielectric Properties				
Density		ρ (g/cm ³)	7,80	7,80
Curie Temperature		T _c (°C)	350	345
Permittivity	in the polarization direction	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1750	1450
	perpendicular to the polarity	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1650	1400
Dielectric loss factor		$\tan \delta$ (10 ⁻³)	20	20
Electromechanical Properties				
Coupling factors	k _p		0,62	0,62
	k _t		0,47	0,48
	k ₃₁		0,35	0,35
	k ₃₃		0,69	0,69
	k ₁₅		0,66	
Piezoelectric charge constants	d ₃₁	(10 ⁻¹² C/N)	-180	-165
	d ₃₃		400	360
	d ₁₅		550	
Piezoelectric voltage constants	g ₃₁	(10 ⁻³ Vm/N)	-11,3	-12,9
	g ₃₃		25	27
Acousto-mechanical properties				
Frequency constants	N _p	(Hzm)	2000	1960
	N ₁		1420	1500
	N ₃			1780
	N _t		2000	1990
Elastic constants (compliance)	S _{11E}	(10 ⁻¹² m ² /N)	16,1	15,6
	S _{33E}		20,7	19,7
Elastic constants (stiffness)	C _{33^D}	(10 ¹⁰ N/m ²)		11,1
Mechanical quality factor		Q _m	80	80
Temperature stability				
Temperature coefficient of ϵ_{33}^T (in the range -20°C up to +125°C)		TK ϵ_{33} (x10 ⁻³ /K)	4	6
Ageing stability (relative change of the parameter per decade in %)				
Relative dielectric constant		C _ε	(-1,0	-2,0
Coupling factor		C _κ		

Anexo V: Características instrumentación

Ficha técnica hidrófono

Free Flooded Rings		
		
	SX30	SX60
Resonance Frequency (kHz)	30	60
Transmit Voltage Response, TVR (dB Ref. 1 μ Pa/Volt @ 1 metre)	133	132
Receive Voltage Response, OCV (dB Ref. 1 volt/ μ Pa.)	-193	-200
Useable Frequency Range (kHz)	20-40	40-70
Beam Pattern Radial Axial	Omni Toroidal (60°)	Omni Toroidal (60°)
Efficiency (% min)	50	50
Input Power (2% duty Cycle)	300W	300W
Operating Depth (Metres)	Unlimited	Unlimited
Cable	1N2	1N2
Weight in grams (with cable)	112	72.5

Ficha técnica Sistema generador adquiredor



Ventas
España
91 640 0085
ni.spain@ni.com

NI PXI-1031DC

Chasis PXI de 4 Ranuras, Alimentación AC/DC

- Combinación de opciones de entrada de potencia de AC y de 11 a 30 VDC
- Acepta ambos módulos, PXI 3U y CompactPCI
- Cable de potencia DC con longitudes personalizadas de hasta 18 ft
- Compatibilidad con accesorios PXI-1031
- Velocidad de ventilador con temperatura controlada AUTO/ALTA
- No se recomienda para diseños nuevos



Ficha técnica amplificador



1040L POWER AMPLIFIER

400 Watts
RF Power
For:

- Ultrasonic
- Industrial
- Medical
- Lab Use



- 10 KHz – 5 MHz
- Power Measurement
 - Forward & Reflected
- Solid State Reliability
- Forced Air Cooling

The 1040L Amplifier is a rugged source of RF power for ultrasonics, induction heating and laser modulation as well as plasma applications. It is a totally solid state solution employing RF DMoS FETs in the power amplification stages, offering simultaneous forward and reverse power readouts, and RS232 port for data collection. The 1040L reflects E&I's commitment to reliable and robust RF power.

Flexible Operation:

The 1040L produces 400 Watts of quasi linear class AB power over a frequency range of 10 KHz to 5 MHz, with a nominal power gain of 55 dB (+/-2dB). Operation over the entire frequency range is possible without the need for any switching.

The front panel display provides simultaneous measurements of forward and reflected power as well as the unit's status. The RS232 connector at the rear of the unit can also be used to capture this data and reset the unit should a fault occur.

The E&I 1040L is a 19" rack mount unit 3U high. It employs an integral power supply capable of operation at 115 or 220 VAC, 50 – 60 Hz. The unit weighs approximately 54 lbs or 25 Kg.

1040L POWER AMPLIFIER

Class of Operation

Class AB

Frequency Range

10 to 5000 KHz

Rated Power Output

400 Watts

Saturated Power Output

500 Watts

Power Gain

55 dB nominal

Gain Flatness

+/- 1 dB to 1 MHz
+/- 2 dB to 5 MHz

Input Power for Rated Output

1.3 mW or 1.14dBm

Input Impedance

50 Ω / VSWR, 1.5:1 Max

Output Impedance

50 Ω / VSWR, 2:1 Max

Ruggedness

Any load VSWR, any phase from open to Short circuit without damage.

Front Panel Accuracy

+/- 3% 100 KHz – 1 MHz

Drive Source Requirements

Any signal Generator, function Generator or oscillator capable of up to 0.7 Vpp into 50 Ω

Protection:

INPUT: unit will withstand up to +13dBm input without damage.

MISMATCH: the unit will tolerate any mismatch subject to thermal and current protection.

Accessories Supplied

The unit is supplied with an operations manual and AC line cord.

Temperature Range

0 – 45° C

AC Power Requirements

104 – 240 VAC
9 A @ 120 V
4.5 A @ 240 V

Cooling

Forced air

Weight

54 lbs (24.4 kg)

Dimensions (H x W x D)

5.3" x 16.5" x 20.0"
134.5 mm x 420 mm x 508 mm

Ficha técnica sonda

TESTEC®
Modulartastköpfe für Oszilloskope
Modular Oscilloscope Probes
100 : 1 / 1500Vp

IEC 1010-2-031
CAT I 1500Vp

Made in Germany

Typ	Teilungs- faktor	Eingangsimpedanz		Bandbreite	Anstiegszeit	Kabel- länge	Kompensations- bereich
Type	Attenu- ation	Loading R (MΩ)	Input C (pF)	Bandwidth	Rise Time (ns)	Cable Length (m)	Compensation Range (pF)
TT - HV 150	x 100	100	4	300	1,2	1,2	10..50
TT - HV 151	x 100	100	6	200	1,8	2,0	10..50

Technische Änderungen vorbehalten !

All specifications are subject to change without notice !

Tastkopfabgleich

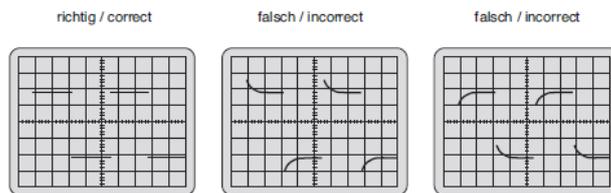
1kHz-Abgleich

Tastkopf an 1kHz Rechtecksignal anlegen.
Trimmerkondensator im Steckergehäuse
auf optimale Rechteckwiedergabe einstellen.

probe adjustment

1kHz-compensation

Connect probe to a 1kHz square wave signal.
Adjust trimmer capacitor in BNC connector-box
for optimum square wave response.



Warnung !

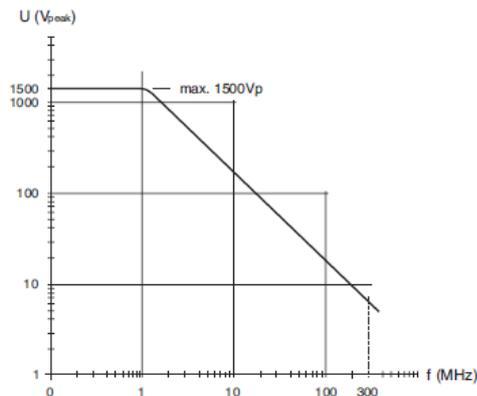
Den Tastkopf niemals demontieren solange dieser mit der Spannungsquelle verbunden ist und nur an geerdete Oszilloskope anschließen.
Der Körper des Tastkopfes ist sauber und frei von leitenden Verunreinigungen zu halten ! Untersuchen Sie den Tastkopf zu Ihrer eigenen Sicherheit vor jedem Gebrauch auf Risse und Beschädigungen der Kabelisolierung. Werden Mängel oder Defekte festgestellt darf der Tastkopf NICHT mehr verwendet werden !

Warning !

Never dismantle the probe while it is combined with the voltage source and only connect it to a grounded oscilloscope.
The probe body should be kept clean and free of any conductive contamination !
For your own safety, inspect the probe for cracks and frayed or broken leads before each use. If defects are noted, DO NOT use the probe !

Maximale Eingangsspannung: 1500 Vp,
abnehmend mit zunehmender Frequenz.

Maximum Input Voltage: 1500 Vp,
reducing with rising frequency.



Ficha técnica Generador adquiredor



Phone 781-665-
Toll Free 1-800-
1-800-517-8431
Visit us at www.TestEquipmentDe

Technical data sheet

HF LCR Meters



- 6505P 5MHz
- 6510P 10MHz
- 6515P 15MHz
- 6520P 20MHz
- 6530P 30MHz
- 6550P 50MHz
- 65120P 120MHz

- Precise high frequency impedance measurements
- Characterize components to 120MHz (65120P)
- Fast measurement speed
- 0.05% basic measurement accuracy
- Comprehensive measurement functions
- Easy to use with large TFT touch screen
- Intuitive user interface
- Fully programmable over GPIB
- Keyboard and mouse control
- Competitively priced

Accuracy and versatility makes these HF LCR Meters the ideal choice for many different tasks and applications in the area of manufacturing test. The wide range of frequency specifications means that a customer can select the model which best meets their requirements and budget.

AC Measurement parameters

- Impedance (Z)
- Phase Angle (\varnothing)
- Capacitance (C)
- Dissipation Factor (D)
- Inductance (L)
- Quality Factor (Q)
- Resistance (R)
- Reactance (X)
- Conductance (G)
- Susceptance (B)
- Admittance (Y)

High measurement accuracy

Capacitance, inductance and impedance basic accuracy are all an excellent $\pm 0.05\%$. Dissipation factor accuracy is ± 0.0005 and the quality factor accuracy is $\pm 0.05\%$.

Technical specifications

Measurement parameters

Any of the following parameters can be measured and displayed:

AC functions

- Impedance (Z)
- Phase Angle (θ)
- Capacitance (C)
- Dissipation Factor (D)
- Inductance (L)
- Quality Factor (Q)
- Resistance (R)
- Reactance (X)
- Conductance (G)
- Susceptance (B)
- Admittance (Y)

Display format

Series or parallel equivalent circuit – all parameters

Test conditions

Frequency range

6505P 20Hz to 5MHz
6510P 20Hz to 10MHz
6515P 20Hz to 15MHz
6520P 20Hz to 20MHz
6530P 20Hz to 30MHz
6550P 20Hz to 50MHz
65120P 20Hz to 120MHz
Frequency step size: 0.1mHz
Accuracy of set frequency $\pm 0.005\%$

AC drive level

10mV to 1Vrms*
200 μ A to 20mA_{rms}*

*Varies with frequency

Signal source impedance: 50 Ω nominal

DC bias

D1 option

0 to +100mA_{dc} bias current; 0 to +40V_{dc} bias voltage

D2 option

-40V to +40V_{dc} bias voltage

Binning (optional)

10 bins with absolute and percentage limits.
25 way D-type interface connector.

Option /B1 (non-isolated)

Common 0V. Bin outputs 0 to 5V (nominal) with >10mA current sink capability.

Option /B2 (isolated)

Common 24V input. Outputs 0 to 24V with >10mA current source capability.

Mode of operation

Meter mode

Allows the instrument to be used as a standard LCR meter

Setup Data

Up to 20 instrument setups may be locally stored.

Measurement connections

Four front panel BNC connectors permit three or four terminal connections with the screens at ground potential.

1J1011 Component Fixture (supplied as standard) allows connection to leaded components and devices.

1J1012 (2 terminal) and 1J1014 (4 terminal) Fixtures allow connection to surface mount devices.

Measurement accuracy

Dissipation factor

$\pm 0.0005 (1+D^2)^*$

Quality factor

$\pm 0.05\% (Q+1/Q)^*$

Capacitance / Inductance / Impedance

$\pm 0.05\%*$

*Varies with frequency, drive level and measured impedance

General

Power Supply

Input voltage 90VAC to 264VAC (Autoranging)

Mains frequency

47Hz to 63Hz

Display

8.4" VGA (640 x 480) colour TFT with touch screen

Local Printer

HP-PCL compatible graphics printing
Centronics / parallel printer port, Epson compatible text / ticket printing

Network Printer

HP-PCL compatible graphics printing

GPIB interface

External instrument control. 24 pin IEEE 488 connector

Remote trigger

Rear panel BNC with internal pull-up, operates on logic low or contact closure

USB interface

Two Universal Serial Bus Interfaces

USB 1.1 compliant

VGA interface

15-way D-type connector to drive an external monitor in addition to the instrument display

Network interface

10/100-BASE-TX Ethernet controller. RJ45 connector

Keyboard interface

Standard USB or PS/2 keyboard port. Instrument front panel remains active with keyboard plugged in

Mouse interface

Standard USB or PS/2 mouse port. Touch screen remains enabled when the mouse is connected.

Bin handler (option)

/B1 option (non-isolated 5V) or /B2 option (Isolated 24V). 25-way D-type connector

Environmental conditions

This equipment is intended for indoor use only in a non-explosive and non-corrosive atmosphere

Temperature range

Storage -20°C to 60°C
Operating 0°C to 40°C
Full Accuracy 18°C to 28°C

Relative humidity

Up to 80% non-condensing

Altitude

Up to 2000 m

Installation category

II in accordance with IEC664

Pollution degree

2 - mainly non-conductive

Safety

Complies with the requirements of EN61010-1

EMC

Complies with EN61326 for emissions and immunity

Mechanical

Height 190 mm (7.5") Width 440 mm (17.37")
Depth 525 mm (20.5") Weight 14.5 kg (32 lb)

Order codes

Description	Order code
6505P 5MHz HF LCR Meter	1J6505P
6510P 10MHz HF LCR Meter	1J6510P
6515P 15MHz HF LCR Meter	1J6515P
6520P 20MHz HF LCR Meter	1J6520P
6530P 30MHz HF LCR Meter	1J6530P
6550P 50MHz HF LCR Meter	1J6550P
65120P 120MHz HF LCR Meter	1J65120P

All models supplied with:-
User manual 2 m AC power cable
Universal component fixture (1J1011) USB memory

Options

Description	Order code
Bin handler (non-isolated)	/B1
Bin handler (isolated 24V)	/B2
DC Bias (0 to +40V, 0 to +100mA)	/D1
DC Bias (-40V to +40V)	/D2