

MULTILAYER DESIGN OF ACOUSTIC SENSORS FOR DARK MATTER BUBBLE CHAMBER DETECTORS

PACS: 43.38.+n; 95.35.+d; 43.58.+z; 43.60.+d.

I. Felis*; M. Ardid; J. Ferrer; J. A. Martínez-Mora
Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres (IGIC)
Universitat Politècnica de València (UPV),
C/ Paranimf, nº1, 46730, Gandia (València), (+34) 96 387 70 00.
*E-Mail: ivfeen@upv.es

ABSTRACT

PICO Collaboration is using bubble chamber detectors searching for Dark Matter. The detector uses piezoelectric sensors in order to detect the acoustic signal emitted by the bubbles that are created within the superheated fluid when a nuclear recoil is produced therein. These sensors are attached on the outer wall of the vessel containing the superheated fluid. Thus, the design of the acoustic matching by interposing a layer of material between the glass of the vessel and the ceramic is critical. A method of characterization, optimization and design of such piezoelectric sensors is presented through a transmission acoustic multilayer model contrasted by experimental, analytical and numerical methods.

RESUMEN

Los detectores de cámaras de burbujas para materia oscura de la Colaboración PICO utilizan sensores piezoeléctricos para la detección de la señal acústica emitida por las burbujas que se crean en el seno de un fluido sobrecalentado cuando se produce un retroceso nuclear. Dichos sensores están pegados en el exterior de las paredes de la vasija que contiene el fluido sobrecalentado, de modo que el diseño de la adaptación acústica entre el cristal de la vasija y la cerámica, mediante una capa intermedia, es crucial. Se presenta un método de caracterización, optimización y diseño de dichos sensores piezoeléctricos a través de un modelo de transmisión acústica multicapa contrastado experimental, analíticamente y numéricamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto FPA2012-37528-C02-02 y Multidark (CSD2009-00064), y por la Generalitat Valenciana ACOMP/2015/175. Gracias a los miembros de la Colaboración PICO por su ayuda y aportaciones.

INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas de la UPV colabora con el detector PICO en la caracterización y optimización de sensores piezoeléctricos que captan la señal acústica generada por el crecimiento de burbujas en un líquido sobrecalentado, generadas por la interacción de partículas con los núcleos de dicho fluido [1]. Esta vía de detección de partículas se emplea para la detección de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMP – Weakly Interacting Massive Particles) propuestas como candidatos para explicar la materia oscura. En la Figura 1 se muestra una fotografía de la versión de 30 litros del detector PICO que utiliza como fluido sobrecalentado CF_3I en donde se han generado burbujas en su interior al detectar un neutrón, así como la ubicación de los sensores piezoeléctricos pegados a las paredes de la vasija.

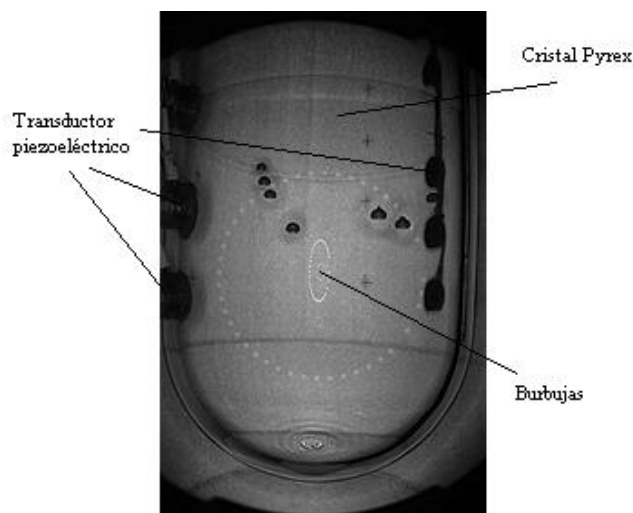


Figure 1. Photography of PICO-60 detector (30 litros de CF_3I) in one of the detected events.

La señal acústica que se genera en el crecimiento de una burbuja en un fluido sobrecalentado ha sido estudiada teórica y experimentalmente, obteniendo una señal cuyo ancho de banda oscila desde muy baja frecuencia, desde unos pocos Hz hasta unos 200 kHz.

El diseño general de transductores piezoeléctricos receptores consta de una serie de pasos que van desde la elección de la cerámica adecuada para las necesidades concretas hasta la optimización de los tipos y dimensiones de capas de adaptación de impedancias (matching layers) entre el medio desde el que se recibe hasta el propio piezoeléctrico, así como el añadir una masa posterior (backing) para ampliar el ancho de banda [2]. No obstante, una característica con especial incidencia en el desarrollo de sensores para PICO es que el medio de interés se encuentra en el interior de una vasija en cuya parte externa de sus paredes se sitúan pegados los detectores. Entonces, una vez establecido el tipo de cerámica más adecuada, tenemos que optimizar la transmisión acústica entre el fluido sobrecalentado y la propia cerámica, con la restricción de que ya se dispone de un medio intermedio (la pared de la vasija) cuyas propiedades no podemos modificar. Con ello, el objetivo de este trabajo es desarrollar un método para optimizar la capa de adaptación adicional para aumentar la sensibilidad de los transductores piezoeléctricos en un determinado rango de frecuencias. Con este fin se han realizado diferentes configuraciones de medida para dos tipos de transductores piezoeléctricos de forma que se pueda apreciar cómo varía la sensibilidad de estos en función de la configuración de capas interpuestas entre la vasija y el piezoeléctrico (variando longitudes del ML, formas, materiales, etc.). También se comparan los resultados experimentales con diferentes modelos teóricos de transmisión, partiendo del caso sencillo, pero no menos importante, de una única capa de adaptación, ampliándolo a un número cualquiera de ellas.

MODELOS DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

Modelo general: n-capas

El modelo en cuestión consiste en incorporar una o más capas entre la cara radiante/receptora del elemento piezoeléctrico y la carga acústica. Estas capas actúan como transformadores mecánicos con aumento de la carga mecánica en la interfase. Imponiendo las condiciones de continuidad de presión y velocidad de partícula en cada una de las interfases, y estableciendo las relaciones entre amplitudes adecuadas podemos obtener, finalmente, el coeficiente de transmisión acústica total. El esquema planteado para resolver este problema se muestra en la Figura 2.

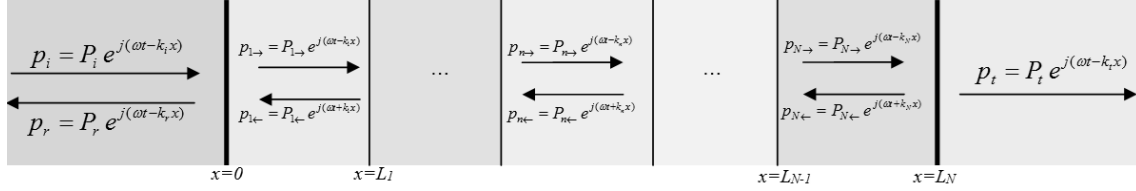


Figura 2. Esquema para explicar el modelo de transmisión acústico a través de n capas

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

1º) calcular para la última capa N:

$$\frac{P_{N\rightarrow}}{P_{N\leftarrow}} = \frac{e^{2jk_N L_N} (Z_t + Z_N)}{Z_t - Z_N} \quad (1)$$

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

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

3º) el coeficiente de reflexión queda:

$$R = \frac{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}} (Z_1 - Z_i) + Z_1 + Z_i}{\frac{P_{1\rightarrow}}{P_{1\leftarrow}} (Z_1 + Z_i) + Z_1 - Z_i} \quad (3)$$

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

$$T_I = 1 - R_I = 1 - |R|^2 \quad (4)$$

A pesar de la generalidad de este modelo, en este estudio nos interesa el caso particular de dos capas: una primera capa de 2,2 mm de espesor de cristal pyrex, que no puede variar, y una segunda capa cuyo material y dimensiones son elegibles a conveniencia. En las siguientes secciones se muestran las distintas configuraciones analizadas y la implementación de dicho modelo, así como su contraste con medidas experimentales.

Caso particular: transmisión a través de una capa

Un caso previo y de especial interés es el de la transmisión de un sistema formado por dos medios semi-infinitos entre los que se ubica una capa de material distinto a los anteriores con un espesor L determinado, tal como se puede ver en la Figura 5. Esta disposición está ampliamente estudiada [3] obteniéndose el siguiente coeficiente de transmisión de intensidad:

$$T_I = \frac{4}{2 + (Z_t/Z_i + Z_i/Z_t) \cos^2(k_1 L) + (Z_1^2/Z_i Z_t + Z_i Z_t/Z_1^2) \sin^2(k_1 L)} \quad (5)$$

Puesto que se conocen la impedancia acústica del medio donde se genera la señal acústica (Z_i) y del medio donde se recibe la señal (Z_t), cumpliéndose que $Z_i < Z_t$, se puede visualizar el comportamiento de esta expresión en función de los parámetros que conciernen a la capa intermedia (Z_1, k_1, L). El comportamiento del coeficiente de transmisión se muestra en la Figura 3 en la que se muestra el comportamiento del coeficiente de transmisión para algunas relaciones concretas entre Z_i, Z_1 y Z_t .

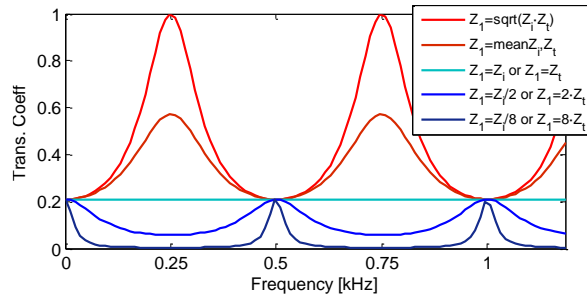


Figura 3. Coeficiente de transmisión unicapa para distintas relaciones de impedancias entre los medios

Se observa que la mayor transmisión se obtiene cuando la impedancia acústica características de la capa intermedia cumple $Z_i < Z_1 < Z_t$ cuando $Z_1 = \sqrt{Z_i \cdot Z_t}$ y para una relación entre su espesor y su número de onda $L = \lambda_1/4n = c_1/4fn = \pi/2k_1n, n$ impar [2]. Éste es el caso entre el cristal pyrex y una cerámica cuando interponemos una capa de aluminio entre ambos, o bien entre el agua y la cerámica cuando únicamente está el cristal pyrex como capa intermedia. Si $Z_1 < \min\{Z_i, Z_t\}$ ó $Z_1 > \max\{Z_i, Z_t\}$ se obtienen máximos de transmisión mucho menores.

En la siguiente sección se implementa la ecuación (5) para obtener la frecuencia de máxima transmisión esperada para cada una de las capas de adaptación interpuestas entre el agua y cada una de las cerámicas piezoeléctricas, y compararemos los resultados con las medidas experimentales.

Caso particular: transmisión a través de una interfaz plana

Este caso corresponde al que se produce cuando la onda incide en el propio transductor, sin la incorporación de una capa de adaptación (Figura 4), dando cuenta de la pérdida inherente que se produce al tener el sensor libre en el propio medio. La solución a este caso particular está nuevamente ampliamente recogida en la bibliografía [3]. El coeficiente de transmisión de intensidad acústica que resulta según la nomenclatura utilizada aquí es:

$$T_I = \frac{4 Z_2/Z_1}{(Z_2/Z_1 + 1)^2} \quad (6)$$

Mediante esta ecuación obtenemos un coeficiente de transmisión esperado ($T_I \sim 0,26$) entre una interfase de dos medios agua ($Z_i \sim 1,5MRayls$) – cerámica ($Z_t \sim 20MRayls$), como las que se utilizan en este trabajo.

MONTAJES EXPERIMENTALES

Configuración 0: Trata únicamente de los piezoeléctricos libres medidos en agua, es decir, de acuerdo con la transmisión a través de una interfase agua-cerámica (ninguna capa). Se han empleado dos tipos de cerámicas piezoeléctricas blandas PIC 255 de la compañía PICeramics, unas tipo disco $\varnothing 25\text{mm}$ h2mm y otras tipo cilindro $\varnothing 10\text{mm}$ h5mm. La elección de estas cerámicas radica en que son semejantes a las ya utilizadas en los detectores PICO-2L y PICO-60, pues tienen un reducido tamaño para poder embeberlas en un encapsulado y presentan elevadas sensibilidades en frecuencias entre 50 kHz y 150 kHz.

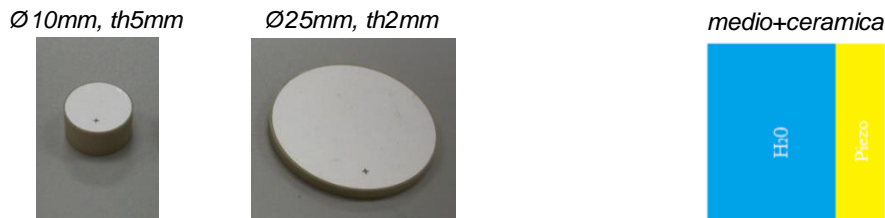


Figura 4. A la izquierda, imagen de las dos cerámicas utilizadas. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.

Configuración 1: Similar a la configuración 0 pero añadiendo la capa intermedia (los diferentes ML) pegados al piezoeléctrico, es decir, transmisión a través de 1 capa. Tal como se ha visto, en una primera aproximación, nos interesa que la impedancia de la capa de adaptación se encuentre entre la del pyrex ($Z_i \sim 11,0 \text{Mrayls}$) y la del piezo ($Z_i \sim 18,4 \text{Mrayls}$), o sea entorno $Z_1 = \sqrt{11,0 \cdot 18,4} = 14,2 \text{Mrayls}$. Por este motivo se ha decidido utilizar un **ML de aluminio** ($Z_1 = 17,2 \text{Mrayls}$), pues además de cumplir bastante bien esta condición, es un material accesible, y no presenta tanta atenuación como otros metales que también cumplen la condición, como el plomo o el estaño [6].



Figura 5. A la izquierda, imagen de dos de las cerámicas utilizadas pegadas a un ML. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.

Configuración 2: Similar a la configuración 1 pero con el ML pegado a las paredes de una vasija de test de 2,2 mm de cristal pyrex, es decir, semejante a un modelo de transmisión a través de 2 capas.



Figura 6. A la izquierda, imagen de todas las cerámicas con ML pegadas a la pared de una vasija de cristal pyrex. A la derecha, esquema de la transmisión acústica.

Caracterización de los materiales

El cristal pyrex, el aluminio y el piezoeléctrico se han caracterizado convenientemente para obtener la densidad, velocidad de propagación e impedancia, tal como se muestra en la Tabla 1. Estos serán los valores que tomaremos para la implementación del modelo teórico.

Elemento	c [m/s]	ρ [kg/m ³]	Z _c [MRayls]
Agua	1500	1000	1,5
Cristal Pyrex	4939 ± 23	2230	11,01 ± 0,06
ML Aluminio	6335 ± 36	2747 ± 13	17,41 ± 0,19
PIC 255	2381 ± 40	7719 ± 160	18,37 ± 0,69
Aire	343	1,29	0,442

Tabla 1. Propiedades medidas de los materiales a emplear

La Tabla 2 muestra las dimensiones de los ML utilizados para nuestro estudio. Dichas dimensiones provienen de un estudio inicial para maximizar la transmisión en las frecuencias de resonancia de las cerámicas sueltas de modo que el espesor del ML corresponda con la cuarta parte de la longitud de onda de dicho modo.

Dimensiones ML de aluminio			
Cerámica	Nombre	Espesor [mm]	Ø [mm]
PIC 255 Ø10mm h5mm	C1	7,7	10
	C2	8,9	10
	C3	16,1	10
	C4	21,5	10
	C5	23,8	10
	C6	31,1	10
PIC 255 Ø25mm h2mm	D1	15	25
	D2	20	25
	D3	25	25
	D4	30	25

Caracterización de los transductores

El modelo de transmisión se ha contrastado con las medidas de sensibilidad de los transductores en las diferentes configuraciones. Ésta ha sido obtenida, en el caso de las configuraciones 0 y 1, situando los transductores en el interior de un tanque de agua, mientras que en la configuración 2, los transductores ya están pegadas a la vasija llena de agua. Todas las medidas se controlan con el sistema de adquisición y generación PXI-1031 y las señales están postprocesadas en Matlab para una correcta distinción entre las emitidas y recibidas [4].

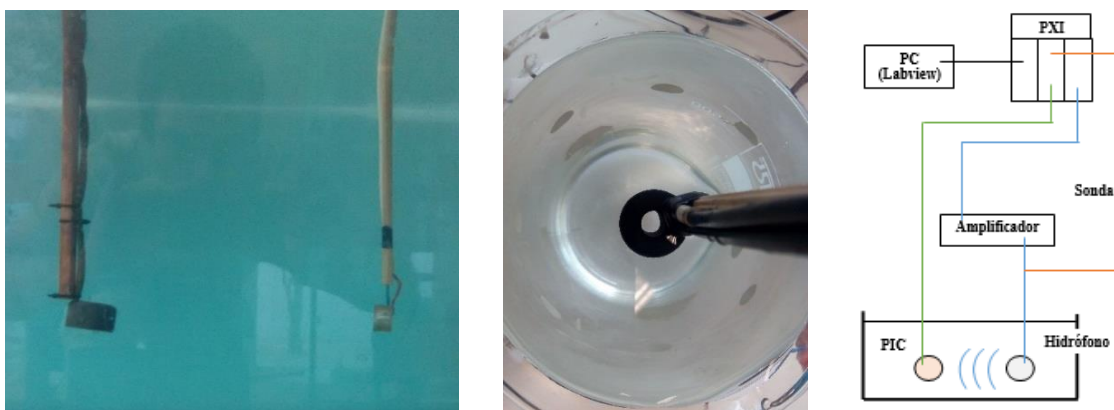


Figura 7. Caracterización de los transductores. A la izquierda, imagen de la calibración en las configuraciones 0 y 1 (emisor FFR x30 de referencia). En el medio, caracterización de la configuración 2 (emisor FFR x60 de referencia). A la derecha, esquema del montaje para el control de medidas.

RESULTADOS: COMPORTAMIENTO DE LA SENSIBILIDAD

Configuración 0: la Figura 8 muestra la sensibilidad obtenidas para cada cerámica. Únicamente aparecen las que se disponían libres (C3-C6 y D2-D4). Para el resto de cerámicas se ha utilizado una extrapolación de los siguientes resultados.

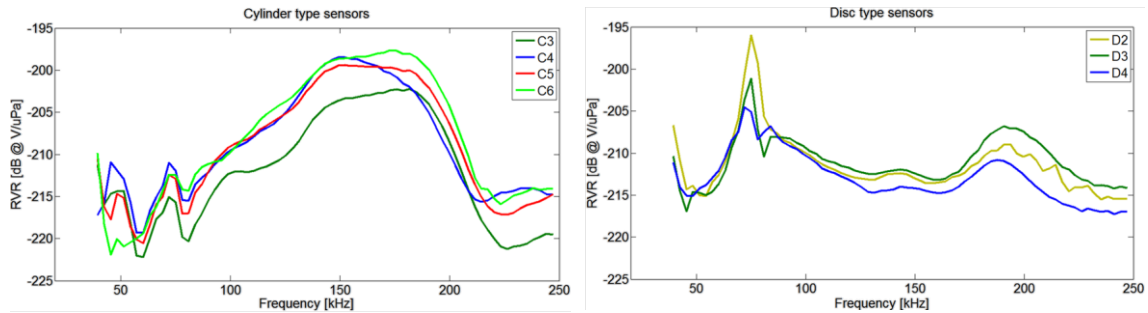


Figura 8. Sensibilidades en recepción de las cerámicas cilindro libres.

Configuración 1: La figura 9 muestra la sensibilidad obtenida para cada uno de los transductores al incorporar el ML. Para una mayor comprensión del comportamiento, mostramos la diferencia entre las sensibilidades con ML y sin ML.

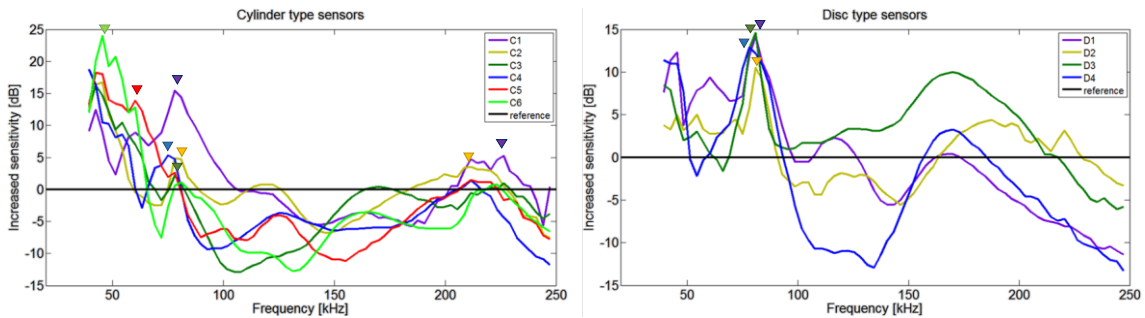


Figura 9. Diferencia de sensibilidad de las cerámicas al incorporar el ML.

En general, la sensibilidad aumenta en todos los ML en frecuencias inferiores a 100 kHz (C1), 60 kHz (C2) y 80 kHz (C3 – C6) para los cilindros, e inferiores a 220 kHz (D3) y 100 kHz (D1, D2, D4) para los discos. Hemos señalado los picos de sensibilidad (▼) que utilizaremos para contrastar con el modelo teórico de una capa (5), tal como se muestra en la Figura 11.

Configuración 2: La Figura 10 muestra la diferencia de sensibilidades entre las cerámicas con ML pegadas a la vasija y la correspondiente a dicha cerámica suelta sin ML.

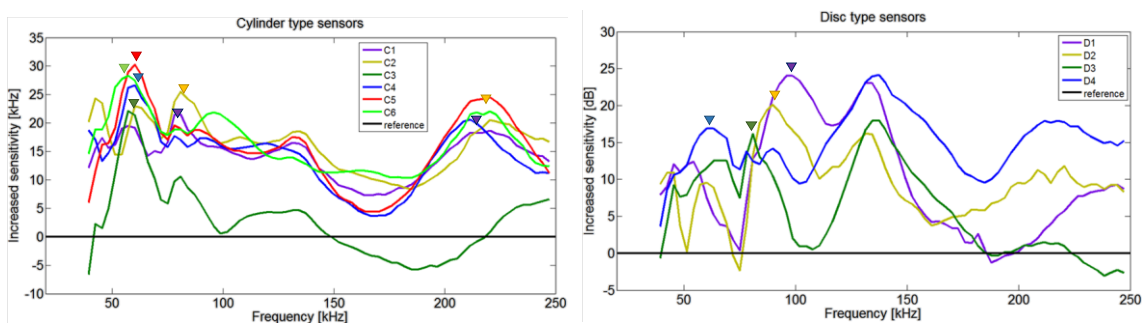


Figura 10. Diferencia de sensibilidad de las cerámicas con ML pegadas a la vasija.

La sensibilidad ha aumentado en prácticamente todos los transductores y todo el rango frecuencial (a excepción del C3 que podría tener algún problema de pegado). En el caso de la cerámica tipo cilindro, el incremento es de entre 10 dB y 25 dB, y las sensibilidades son parecidas entre ellas. En el caso de cerámicas tipo disco, el incremento es más variable pero destacamos el transductor D4 como el más sensible. Además, destacamos los picos señalados de sensibilidad (▼) para posteriormente contrastar con el modelo teórico de dos capas comentado anteriormente. El resultado se muestra en la Figura 15.

RESULTADOS: CONTRASTE CON MODELO TEÓRICO

La siguiente Figura 11 reúne las posiciones frecuencias de cada pico de sensibilidad, que hemos cogido de las Figuras 9 y 10, para cada espesor de ML de la configuración 1 (izquierda) y de la configuración 2 (derecha). Los círculos (●) corresponden a las sensibilidades de transductores tipo cilindro, mientras que las cruces (x) a los tipo disco. Además, en colores vemos los resultados teóricos obtenidos teniendo en cuenta los valores medios de los materiales (líneas sólidas) así como sus incertidumbres (sombreados) que hemos mostrado en la Tabla 1.

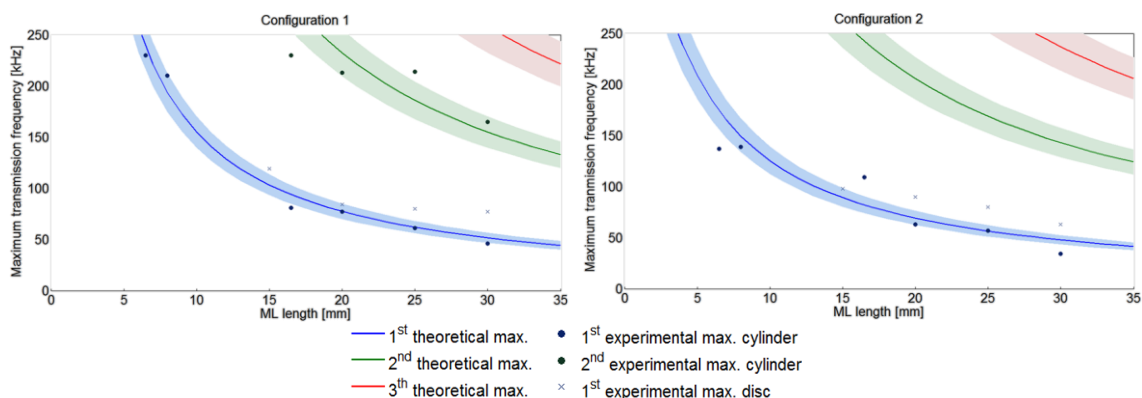


Figura 11. Frecuencias de máxima transmisión acústica vs. espesor de la capa intermedia de aluminio según el modelo de transmisión de una capa (izda.) y de dos capa (dcha.). Contraste con frecuencias de máxima sensibilidad (RVR) para los distintos ML que se han estudiado experimentales.

Configuración 1: respecto a las cerámicas con geometría cilindro, el primer máximo frecuencial (azul) se aproximan bastante bien a los valores esperados, con desviaciones inferiores al 5 % respecto a la curva teórica. En el caso del segundo máximo frecuencial (verde), aunque se trata de cada vez frecuencias más elevadas y de menor interés para nuestros propósitos, la dispersión de los valores es mayor pero se puede apreciar cierta tendencia de los datos con respecto a la curva teórica. En el caso de las cerámicas tipo disco, las primeras resonancias son en general un poco mayores al valor esperado y la tendencia no es tan clara como en el caso anterior. Esto puede deberse a que las máximas frecuencias esperadas están próximas a la frecuencia de resonancia de la cerámica libre, por lo que es más difícil de discernir un aumento en su proximidades. Aun así, existe un aumento de la transmisión acústica en estas frecuencias, que mejora la sensibilidad de estos transductores en estas bajas frecuencias, de mayor interés.

Configuración 2: la incorporación de la capa de 2,2 mm de pyrex afecta sobretodo a los ML de tamaños pequeños, reduciendo las frecuencias de máxima transmisión, es decir, para el mismo espesor de ML se tiene ahora menores frecuencias de resonancia que en el caso con solamente ML. Esto era de esperar dado que se está añadiendo masa, y tamaño al sistema. A partir de 20 mm de espesor de ML, el efecto del cristal pyrex es prácticamente despreciable respecto de los resultados obtenidos en la configuración 1. Contrastando con resultados experimentales, el aumento de sensibilidad no ha sido tan claro dado que los picos no eran tan prominentes como antes. Aun así, en el caso de cerámicas tipo cilindro los resultados se acercan al modelo teórico aunque algunos valores se desvían un poco como es el caso del ML de 7,7 mm i del 16,1 mm. En el caso de las cerámicas tipo disco las frecuencias siguen siendo de nuevo mayores a las esperadas pero sí se observa cierto aumento frecuencial para espesores menores, tal como se esperaba.

REFERENCIAS

- [1] C.Amole, et al. *Dark Matter Search Results from the PICO-2L C3F8 Bubble Chamber*. Physical Review Letters. **114**, 231302 (2015).
- [2] A.Arnau. *Piezoelectric Transducers and Applications*. 2nd ed. Springer (2008).
- [3] L.E.Kinsler. *Fundamentals of acoustics*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. (2000).
- [4] S.Adrián, et al. *Acoustic signal detection through the cross-correlation method*. Ad-hoc Networks and Wireless, pp.66-79 (2015).
- [5] M.Bou, I.Felis, M.Ardid. *Acoustic studies for alpha background rejection in dark matter bubble chambers detectors*. Low Radioactivity Techniques 2013. **1549**, pp.142-147. (2013).
- [6] I.Felis, M.Bou, M.Ardid. *Tecnologías acústicas para la detección de Materia Oscura*. XXXIV Bienal de Física. Real Sociedad Española de Física (2013).