48º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON UNDERWATER ACOUSTICS APPLICATIONS
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE BUILDING ACOUSTICS

SIMULACIÓN Y DISEÑO DE UN SENSOR ACÚSTICO PIEZOELÉCTRICO PARA DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

PACS: 43.35.Zc

Campo Valera María Mercedes; Ardid Ramírez Miguel; Felis Enguix Ivan; Martínez Mora Juan Antonio.
Universidad Politécnica de Valencia
C/Paraninf 1, 46730, Grao de Gandía, Valencia. España
Tel: (+34) 963 870 000 - Ext. 43681
Fax: (+34) 962 849 309
E-mail: macamva@epsg.upv.es

ABSTRACT

Bubble chambers used in detectors for detecting dark matter use piezoelectric sensors in order to detect and discriminate the acoustic signals from bubbles growth in the superheated liquid when a particle interaction occurs. The Research Group in *Applied Acoustics to Astroparticles Detection* from UPV developed a particle detector, whose acoustic sensors are attached to the outer walls of the chamber. In order to optimize the operation of the sensor, both analytical and numerical models are developed, as well as experimental tests for characterization of sensors design were performed. The results of these studies allows a particular design criterion for the construction of such sensor for future dark matter bubble chamber detectors.

RESUMEN

Las cámaras de burbujas empleadas en los detectores para la detección de materia oscura, utilizan sensores piezoeléctricos para detectar y discriminar las señales acústicas emitidas por las burbujas que se generan a partir de la interacción de partículas con el fluido sobrecalentado presente en el interior de dicha cámara. El grupo de Investigación en *Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas* de la UPV ha desarrollado un modelo de detector de partículas, cuyos sensores acústicos se encuentran pegados en las paredes exteriores de la cámara. Con el objetivo de entender el comportamiento y optimizar el funcionamiento del sensor, se desarrollan modelos analíticos y numéricos, así como pruebas experimentales para su caracterización. Los resultados de estos estudios permiten tener un criterio de diseño para la adecuada construcción de tales sensores en futuras cámaras de burbujas para la detección de materia oscura.

1. INTRODUCCIÓN

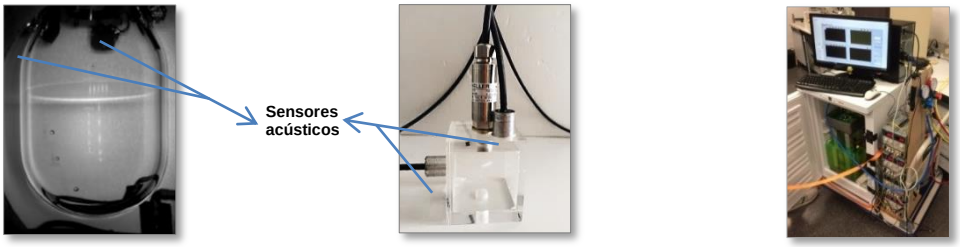
La materia oscura constituye el 25% de toda la energía-materia del Universo. Sin embargo, aunque se tienen evidencias de su existencia, aun no se ha podido detectar la posible partícula que la compone porque interactúa muy débilmente con el resto de la materia conocida. Es por esto que comprender la naturaleza de la materia oscura es uno de los retos más importantes de la física de partículas moderna [1].

Se sabe que la materia oscura existe por los efectos que provoca, ya que ejerce atracción gravitatoria sobre la materia ordinaria, que sí se puede ver. Su estudio nace con el fin de explicar las altas velocidades de rotación de las galaxias dado que si estas no tuvieran una gran cantidad de masa oculta se desmembrarían**.**

Uno de los candidatos para comprender la naturaleza de la materia oscura son unas partículas conocidas comúnmente como WIMP, traducido al español como "Partículas Masivas que Interactúan Débilmente" ya que al interactuar muy raramente con otras formas de materia, son muy difíciles de detectar.

Se han desarrollado distintas técnicas para alcanzar la detección de este tipo de partículas. Entre ellas, las basadas en la detección directa de partículas a través de los Detectores de Partículas. Una clase de estos detectores están basados en cámaras de fluidos sobrecalentados como los desarrollados por la colaboración PICO (conformada de la unión de PICASSO Y COUPP) o MOSCAB (del INFN en Milán) [**2, 3, 4, 5**]. El principio fundamental de estos detectores se basa en que la colisión de una partícula con uno de los núcleos del fluido sobrecalentado provoca su retroceso, cuya energía se invierte en cambiar de fase el líquido, produciendo una burbuja en un proceso llamado nucleación. En todo este proceso se emite una señal acústica característica de tipo pulso; dicha señal es analizada en un rango frecuencial hasta los 200 kHz donde esta tiene la mayor parte de su energía.

El grupo de investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas de la UPV que colabora con el detector PICO y MOSCAB en la caracterización y optimización de sensores acústicos, construyó el detector de partículas MODA-LS (Materia Oscura Detectada Acústicamente con Líquido Sobrecalentado) basado en tecnología Géiser, que es una variante de la técnica del fluido sobrecalentado. En la siguiente *figura 1*, se observan las cámaras de burbujas de dichos detectores.



(a) *(b)* *(c)*

Fig. 1. (a) Cámara de burbujas detector PICO 2L (Fuente: Dark Matter Search Results from the PICO-2L C3F8 Bubble Chamber C. Amole, et al., Phys. Rev. Lett. 114, 231302 año 2015). (b) Cámara de burbujas detector MODA-LS. (c). Detector de partículas MODA-LS.

A continuación se presenta un estudio que parte de simulaciones y medidas experimentales para caracterizar y diseñar dos *sensores acústicos piezoeléctricos* que van pegados en la parte exterior de la cámara de burbujas que contiene en su interior el fluido sobrecalentado R134a.

2. PARTES DEL DISEÑO DEL SENSOR ACÚSTICO

a. El **medio** donde se genera la señal acústica, siendo el fluido R134a.
b. Una **cerámica** piezoeléctrica que se adapte a las características de la señal acústica.
c. La **capa de adaptación (ML)**, que tienen las cerámicas por defecto al estar pegadas a las paredes de metacrilato que conforman la cámara de burbujas de 5 mm y 10 mm de espesor.
d. El **encapsulado (housing)**, fabricado con un material de aluminio.

2.1 Medio de recepción: interior de la cámara de burbujas

Para la detección acústica de la señal generada por el crecimiento de burbujas se utiliza el freón R134a (CH_2FCF_3), también denominado 1,1,1,2-Tetrafluoroetano, como fluido sobrecalentado, debido a que presenta una mayor sensibilidad para bajas masas de materia oscura [6] y trabajando a una presión de 1, 2 y 3 bares. Todos los procesos acústicos se desarrollan en la cámara inferior; tales como la generación, crecimiento de la burbuja y consecuente emisión acústica. Dado que la estabilidad termodinámica del detector obliga a que se ubique una segunda cámara (se necesita una cámara en fase líquida sobrecalentada y la otra en fase gaseosa), la superior, se realiza un estudio de modos con el sistema completo (cámara de burbujas).

Fig. 2.Cámara de burbujas detector MODA-LS

2.1.1 Análisis medio de recepción

En la siguiente *figura 3*, se representan los modos propios teniendo en cuenta el interior de la cámara, es decir; el fluido a 2 bares de presión y el espesor de la misma. Además, se estudia la desviación típica de la cámara emisora y toda la cámara completa con y sin paredes de metacrilato *en la figura 4,* para estudiar el efecto de dichas paredes en los modelos.

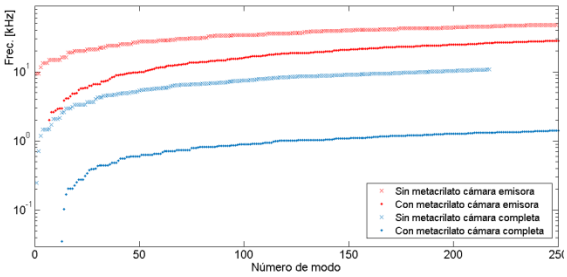


Fig. 3. Comparación distribución de modos en varias configuraciones de la cámara de burbujas.

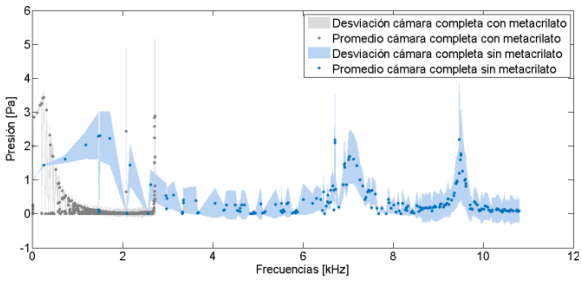


Fig. 4. Desviación típica y promedio, cámara completa sin metacrilato vs. con metacrilato.

Se observa en la *figura 3*, que la cámara emisora sin metacrilato comparada con la misma pero con metacrilato, se refleja en una reducción del rango frecuencial para el número de modos simulados, de modo que la frecuencia fundamental baja desde 9 hasta 2 kHz y se alcanza una frecuencia máxima de 47 y 28 kHz respectivamente. Algo similar ocurre para la cámara de burbujas completa sin metacrilato comparada con la misma pero con metacrilato, la frecuencia fundamental baja desde 716 hasta 516 Hz, y la frecuencia máxima que se alcanza es de 10 kHz y 1.4 kHz respectivamente.

En *la figura 4*, hay una disminución hacia las bajas frecuencias desde los 252 Hz hasta 1.4 kHz. Para la cámara sin metacrilato, existe una mayor varianza en el promedio y por ende en la desviación. Se puede decir, que la presencia del metacrilato permite un aumento tanto de bajas frecuencias como de presiones respecto a la cámara emisora sin metacrilato, importante para el detector.

2.2 Cerámica piezoeléctrica

Se escoge la cerámica *PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor* ya que posee una sensibilidad bastante alta en el rango de frecuencias deseado hasta ~150 kHz y es semejante a las que se utilizan en los detectores PICO. La *figura 5,* muestra una fotografía de dicha cerámica.

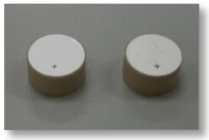


Fig. 5. Cerámica PIC 255 Ø10 mm y 5 mm.

Las simulaciones FEM de sensibilidad acústica y admitancia eléctrica, se llevaron a cabo en COMSOL Multiphysics. Siendo los parámetros de entrada los coeficientes de la matriz de elasticidad, la matriz de acoplamiento, la matriz de permitividad, la densidad, y las pérdidas mecánicas y dieléctricas, respectivamente. La geometría se estableció para que coincidiera con las condiciones experimentales de la cerámica medida. Posteriormente se implementa un modelo analítico en modo radial en 1D, por Stewart Sherrit [7].

2.2.1 Análisis cerámica piezoeléctrica

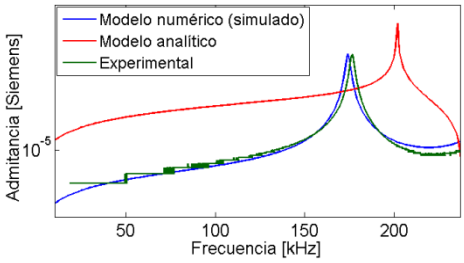


Fig. 6. Gráfica de la admitancia. Analítico vs. Simulado.

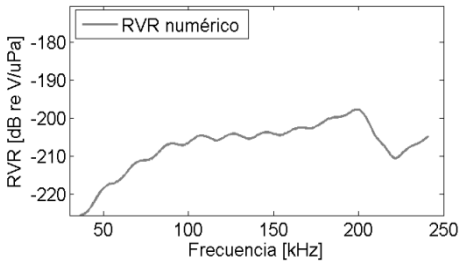


Fig. 7. Curva de sensibilidad acústica.

En la *figura 6*, Se observa que la frecuencia de resonancia obtenida con el modelo analítico 1D es de *fr=202 kHz* y en el modelo numérico simulado en COMSOL, se obtiene una *fr=174 kHz*. Esta diferencia, se debe a que en el modelo analítico no se tienen en cuenta las pérdidas ocasionadas por la cerámica. La medida experimental con *fr=176 kHz* es parecida al modelo analítico.

La *figura 7,* simulada a través de COMSOL muestra una aproximación a lo que será la medida experimental de la sensibilidad. Se nota, cómo la sensibilidad presenta un comportamiento casi homogéneo en amplitud de ~205 dB re V/uPa a partir de la frecuencia de 88 kHz.

2.3 Capas de adaptación de impedancia acústica (Matching Layer)

Como los sensores se encuentran pegados en las paredes exteriores de la cámara de burbujas. El diseño debe ser optimizado para una buena transmisión acústica entre el fluido y la cerámica. Se emplea como ML la pared exterior de la cámara conformada por metacrilato de 5 y 10 mm de espesor, según pared. Se tiene que la impedancia acústica del medio fluido R134a es de Z_i *0.8875 MRayls*, y la de la cerámica Z_t *31.2 MRayls*, el ML debe tener una impedancia de $Z_1 = \sqrt{Zi \cdot Zt} = 5.32$ *MRayls* [8]. En principio, no se puede alcanzar una transmisión óptima. Aun así, se calculan las curvas de transmisión resultantes al pegar los sensores a ambas paredes de la cámara y predecir las frecuencias donde aumentará su sensibilidad.

2.3.1 Análisis capas de adaptación (ML)

A continuación se presenta en la *figura 8*, las curvas de transmisión resultantes, tanto simulada en COMSOL como analítica realizada en Matlab, en las diferentes presiones de trabajo.

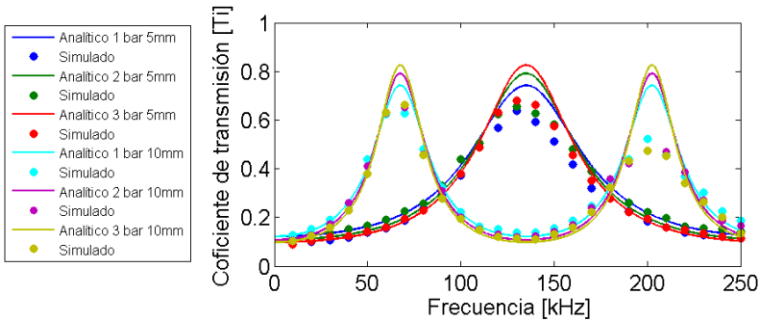


Fig. 8. Comparación del coeficiente de transmisión acústico con 1 capa de metacrilato, analítico vs. numérico.

Se observa cómo, en general, los máximos de transmisión analíticos (~0.75) son un poco mayores a los obtenidos numéricamente (~0.65) pero la posición frecuencial de dichos máximos coincide con bastante precisión en ambos métodos. El máximo se produce para la frecuencia tal que su espesor sea igual a un cuarto de la longitud de onda, es decir, que es independiente del fluido y de la cerámica.

El metacrilato como capa de adaptación diseñado con dos espesores de 5 y 10 mm, presenta una transmisión máxima de tres picos, donde a 10 mm hay un máximo para bajas frecuencias de entre los *67.4* y *70 kHz*, y otro máximo a frecuencias altas del orden de *200 kHz*, reforzando estas altas frecuencias con el espesor de 5 mm de *135 kHz*. Logrando así optimizar el comportamiento del sensor. En general se espera un índice de transmisión $\boldsymbol{T_i}$ entre un 70% u 80% de la energía emitida en el medio y recibida en la cerámica.

2.4 Encapsulado (Housing)

En todas las medidas de calibración acústica realizadas se puede observar en la señal recibida, tanto la onda acústica como la onda electromagnética, que se generan en todo proceso de emisión-recepción en cerámicas piezoeléctricas. En la *figura 9,* se muestra un ejemplo de una de las señales de calibración donde para esta frecuencia y configuración, la onda acústica empieza después de que termina la recepción de la onda electromagnética.

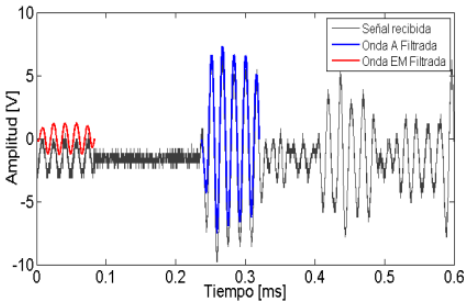


Fig. 9. Señal recibida en proceso de emisión-recepción.

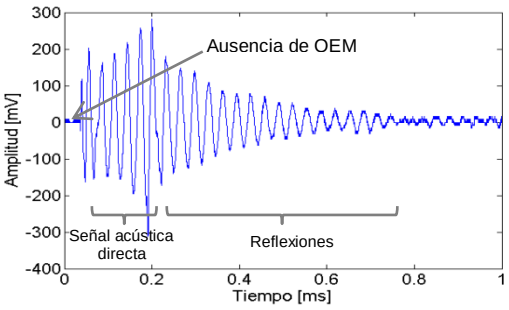


Fig. 10. Señal acústica recibida por una cerámica encapsulada.

En la *figura 10*, se observa cómo al encapsular una cerámica, la onda electromagnética desaparece. Por lo tanto, se pude concluir que es necesario el diseño de un encapsulado adecuado para evitar la influencia de ondas electromagnéticas así como para aislar la cerámica y los cables del medio circundante.

2.4.1 Diseño y construcción

El diseño del encapsulado se realiza mediante el software AutoCAD. Este consiste en dos partes: la posterior, donde irá pegada la cerámica y la parte frontal, encargada de enroscar y proteger el interior del encapsulado. Todo el encapsulado se construye de aluminio, material con buena conducción a la electricidad, de bajo coste y resistente a altas temperaturas. En la siguiente *figura 11*, se observa el proceso de construcción del mismo.

Fig. 11. Diseño del encapsulado

3. Métodos de caracterización del sensor

La *admitancia eléctrica* y la *sensibilidad acústica (RVR)* son características que definen a los sensores piezoeléctricos. Los montajes experimentales consisten en medidas con cerámica y sensores libres en agua para posteriormente realizar medidas de estudio con hidrófono emisor dentro de la cámara de burbujas.

A través de la diferencia de potenciales, se mide la respuesta que devuelve el transductor obteniendo así la admitancia eléctrica. La sensibilidad, se calcula a través del RVR emitiendo con el transductor FFR-SX60 una señal senoidal desde los 10 kHz hasta 250 kHz. La cerámica se mide dentro de un tanque de agua con dimensiones de 1.20x0.80x0.60 m^3, a una distancia del emisor de 23 cm, tal como se observa en la *figura 12 (c*).

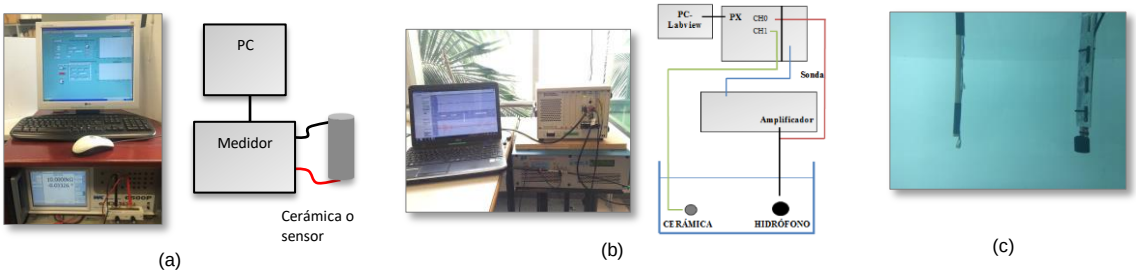


Fig. 12. Montaje y esquema experimental. (a) Admitancia eléctrica; (b) Sensibilidad acústica; (c) Ejemplo de medida de cerámica libre.

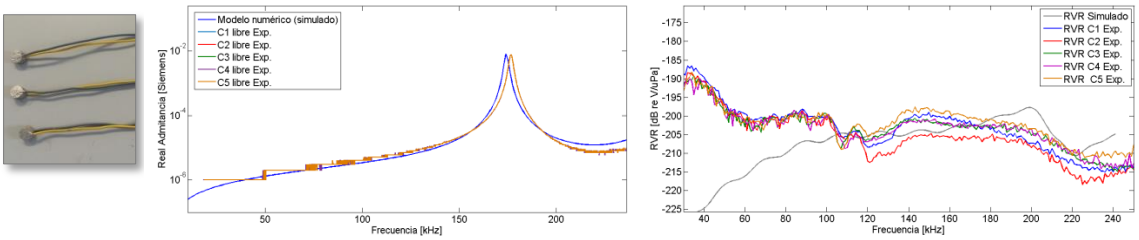
En el siguiente montaje, se emplea el hidrófono emisor RESON TC4013 que se incorpora dentro de la cámara de burbujas con agua en su interior, como se muestra en la siguiente *figura 13*. Se emite una señal sinusoidal de 5 ciclos, con un barrido frecuencial desde los 10 kHz hasta los 250 kHz. Posteriormente se comparan los resultados con los modelos analíticos y numéricos (simulado) presentados anteriormente.

Fig. 13. Montaje y esquema de medida: sensores pegados con hidrófono emisor.

4. Resultados

A continuación se presentan dos montajes para las medidas experimentales; el primero con las medidas de cerámicas y sensores libres, y el segundo con las medidas de sensores pegados: estudio con hidrófono emisor.

4.1 Cerámicas y sensores libres



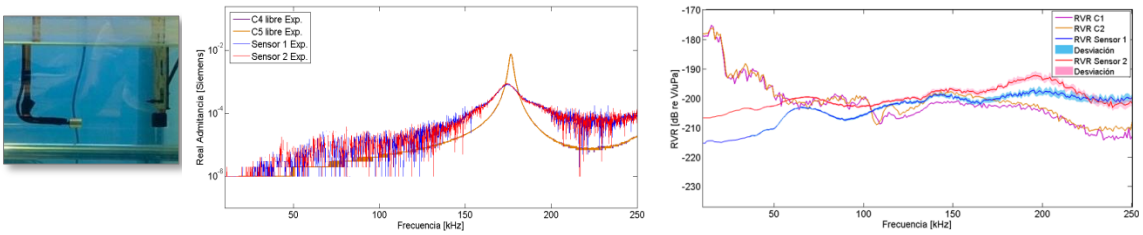
(a) *(b)* *(c)*

Fig. 14. Medida de cerámicas libres. (a) Fotografía de cerámicas libres, (b) Gráfica de admitancia, (c) Gráfica de sensibilidad.

En la *figura 14 (b)*, se miden 5 cerámicas y se observa que la medida experimental de la ***admitancia*** se mantiene idéntica entre ellas, con una *fr*=176 kHz. Al compararlas con la obtenida en la *sección* ***2.2.1***, se observa que el modelo numérico es acertado con una *fr=174 kHz*. En este máximo de admitancia se potencia el ancho de banda del sensor.

Respecto a la ***sensibilidad acústica (RVR)*** se seleccionan las cerámicas C4 y C5 para la construcción de los sensores acústicos, ya que se mantienen más estable los valores de dicha sensibilidad, desde los -195 dB hasta los -203 dB entre los 50 kHz hasta 250 kHz. El modelo numérico (simulado), se acerca a la medida experimental a partir de los ~105 kHz.

En la *figura 15* para los sensores libres, se observa que comparando la curva de ***admitancia eléctrica*** de las cerámicas y los sensores libres, se tiene una *fr=176 y 174 kHz* respectivamente. Esta leve disminución hacia bajas frecuencias de los picos de la curva de los sensores y la disminución en el valor de la misma, se debe al aumento de la masa y el espesor que ofrece el propio encapsulado.



(a) *(b)* *(c)*

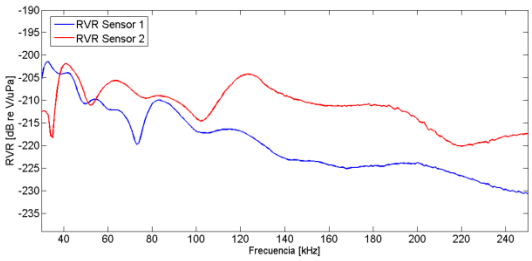
Fig. 15. Medida de sensores libres. (a) Fotografía de sensores libres; (b) Gráfica de admitancia; (c) Gráfica de sensibilidad.

Respecto a la gráfica de sensibilidad, ésta mejora al tener las cerámicas dentro del encapsulado, permitiendo una respuesta más plana a lo largo de todo el barrido frecuencial a partir de los 50 kHz. Se observa un aumento considerable a partir de los 174 kHz en comparación con la curva de cerámicas libres. A nivel general el *sensor 2*, presenta una ***sensibilidad acústica (RVR)*** un poco mayor que el *sensor 1*.

4.2 Sensores pegados: medida con hidrófono emisor

Este último montaje experimental, se realiza con el fin de encontrar una relación entre las posibles frecuencias máximas que se obtengan con la curva de *sensibilidad (RVR)* y las presentadas anteriormente.

(a)



(b)

Fig. 16. Medida de sensores libres. (a) Fotografía sensores pegados, (b) Gráfica de sensibilidad.

En esta gráfica se observa claramente cómo en el *sensor 1* pegado en la pared de 10 mm, existe un aumento en *82 kHz* respecto del restante espectro analizado (salvo en los valores más bajos de frecuencia), valor que se asemeja al modelo numérico (simulado) de *70 kHz*. Para el *sensor 2*, se encuentra una mayor sensibilidad en *124 kHz*, próxima al modelo numérico de *135 kHz*.

5. Conclusiones

En el estudio de *modos de la cámara* para el detector MODA-LS se concluye que la presencia del metacrilato conduce a un aumento de bajas frecuencias (disminución de modos propios) así como a un ligero aumento de amplitudes de la presión resultante.

La *frecuencia de resonancia* del modelo analítico es mayor al modelo numérico, ya que no se tienen en cuenta las pérdidas de la cerámica.

Para el ML se concluye que en general se espera un índice de transmisión $\boldsymbol{T_i}$ entre un 70% u 80% de la energía emitida en el medio y recibida en la cerámica.

La *sensibilidad acústica (RVR)* mejora en algunos rangos frecuenciales al encapsular las cerámicas y permite una respuesta más plana a lo largo de todo el barrido frecuencial a partir de los 50 kHz, presentando un aumento considerable a partir de los *174 kHz* en comparación con la curva de *sensibilidad acústica (RVR)* de cerámicas libres. A nivel general el *sensor 2*, presenta una *sensibilidad acústica (RVR)* un poco mayor que el *sensor 1*.

El montaje experimental; sensores pegados: estudio con hidrófono emisor, se concluye en la *sensibilidad acústica (RVR)*, que los valores de transmisión máxima (T_i) presentados en la *sección 2.3.1* se corresponden acertadamente con las gráficas experimentales obtenidas. Por lo tanto, los sensores presentan un buen desempeño para detector de partículas MODA-LS.

Actualmente los sensores se encuentran en fase de calibración en Italia con el detector MOSCAB.

Bibliografía

[1] A. D. Ernest, Dark Matter and Galactic Halos A Quantum Approach. School of Physical Sciences and Engineering, University of New England, Armidale, Australia, 2001.

[2] M. Ardid, M. Bou Cabo, I. Felis and J. A. «Martínez Mora. MOSCAB: direct dark matter search using the geyser technique,» *Nuclear and Particle Physics Proceedings* Vol. 273–275, pp. 2354–2356, 2016.

[3] Ivan Felis, Juan Antonio Martínez Mora y Miguel Ardid. «Acoustic Sensor Design for Dark Matter Bubble Chambers Detectors,» Sensors 2016.

[4] C. Amole y et al., «Dark Matter Search Results from the PICO-60 C3F8 Bubble Chamber,» Phys. Rev. Lett. 118, 251301, 2017.

[5] A. Antonicci, M. ardid et al., «MOSCAB: A geyser-concept bubble chamber to be used in a dark matter search,» arXiv:1708.00101, 2017.

[6] Ivan Felis Enguix. *Tecnologías acústicas para la detección de materia oscura.* Universitat Politècnica de València. Gandia: Tesis Doctoral, 2017.

[7] Stewart Sherrit, Binu K. Mukherjee, «Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers,» Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Pasadena, California, USA, arXiv:0711.2657, 2007.

[8] L.E. Kinsler, Fundamentals of acoustics. 4ed, John Wiley & Sons, Inc., 2000.