

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

MÁSTER EN INGENIERÍA ACÚSTICA



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Simulación y diseño de un sensor acústico piezoeléctrico para detección de partículas”

TESIS DE MÁSTER

Autor:

María Mercedes Campo Valera

Director/es:

D. Juan Antonio Martínez Mora

D. Iván Felis Enguix

GANDÍA, 7 de septiembre de 2016

Simulación y diseño de un sensor acústico piezoeléctrico para detección de partículas

Autor: María Mercedes Campo Valera

Director 1: Juan Antonio Martínez Mora

Director 2: Iván Felis Enguix

Resumen — Las cámaras de burbujas empleadas en los detectores para la detección de materia oscura, utilizan sensores piezoeléctricos con el fin de detectar y discriminar las señales acústicas emitidas por las burbujas, que se generan a partir de la interacción de partículas subatómicas 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 desarrolla un detector de partículas, cuyos sensores acústicos irán pegados a las paredes exteriores de la cámara, y sus resultados serán diseñados y presentados a lo largo de esta tesina. Con el objetivo de entender el comportamiento y optimizar el funcionamiento del sensor, se realizan tanto modelos analíticos y numéricos (simulados), así como pruebas experimentales para su caracterización. Los resultados de estos estudios permitirán tener un criterio de diseño para la construcción concreta de tales sensores.

Palabras claves: materia oscura, detección acústica de partículas, cámara de burbujas, cerámica piezoeléctrica, fluido sobrecalentado, diseño y caracterización de sensores piezoeléctricos.

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 an interaction particle occurs. Meanwhile, the Research Group in *Applied Acoustics to Astroparticles Detection* from UPV develops a particle detector, whose acoustic sensors shall be attached to the outer walls of the chamber, which results will be designed and presented in this dissertation. In order to optimize the operation of the sensor, both analytical and numerical models (simulated), 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.

Keys words: dark matter, acoustic detection of particles, bubble chamber, piezoelectric ceramic, superheated fluid, design and characterization of piezoelectric sensors.

Autor: María Campo Valera, email: macamva@epsg.upv.es

Fecha de entrega: 07-09-16

ÍNDICE

I.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
II.- PARTES DEL DISEÑO DEL SENSOR ACÚSTICO	7
II.1- Medio de recepción: interior de la cámara de burbujas.....	8
II.1.1- Breve descripción del medio: fluido R134a.....	8
II.1.2- Modelo numérico	10
II.1.3- Modelo analítico.....	13
II.1.4- Análisis del medio de recepción (estudio de casos).....	14
II.2- Cerámicas piezoeléctricas	20
II.2.1- Elección de la cerámica y estudio de los modos	20
II.2.2- Modelo numérico	22
II.2.3- Modelo analítico.....	25
II.2.4- Análisis de la cerámica piezoeléctrica seleccionada	26
II.3- Capas de adaptación de impedancia acústica (Matching Layer).....	28
II.3.1- Importancia de las capas de adaptación	28
II.3.2- Modelo numérico	29
II.3.3- Modelo analítico.....	31
II.3.4- Análisis de las capas de adaptación.....	33
II.4- Encapsulado (Housing)	35
II.4.1- Importancia del encapsulado.....	35
II.4.2- Diseño y construcción	36
III.- MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR.....	39
III.1- Magnitudes del sensor a caracterizar	39
III.1.1- Admitancia eléctrica	39
III.1.2- Sensibilidad acústica (RVR).....	40
III.2- Montajes experimentales.....	42
III.2.1- Medidas de cerámicas y sensores libres.....	43
III.2.2- Medidas de sensores pegados: estudio con chispas	44
III.2.3- Medidas de sensores pegados: estudio con transductor emisor	46
IV.- RESULTADOS	47
IV.1- Resultados de las distintas configuraciones	48
IV.1.1- Cerámicas y sensores libres	48
IV.1.2- Sensores pegados: estudio con chispas.....	53
IV.1.3- Sensores pegados: estudio con hidrófono emisor	55
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	57
AGRADECIMIENTOS	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXO	64

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La *materia oscura* constituye el 25% de toda la materia del Universo. Sin embargo, aunque se tienen evidencias de su existencia, aun no se ha podido detectar como partícula 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 [1,2].

Aunque la materia oscura no se pueda ver, se sabe que esta 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 [3] dado que si estas no tuvieran una gran cantidad de masa oculta se desmembrarían. Otras evidencias de que la materia oscura existe son las lentes gravitacionales [4], ciertas fluctuaciones en el Fondo Cósmico de Microondas [5], entre otros.

Uno de los candidatos para comprender la naturaleza de la materia oscura son unas partículas conocidas comúnmente como WIMP, siglas en inglés de *Weakly Interacting Massive Particles*, 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 [6].

A lo largo de estos años, 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) [7,8] o MOSCAB (del INFN en Milán) [9,10,11]. 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. Una vez generada la burbuja, el equilibrio termodinámico entre el interior y el exterior de la burbuja produce su crecimiento. En todo este proceso se emite una señal acústica característica de tipo pulso.

En el caso de PICO, los detectores consisten en una vasija de sílice fundido llena de freón C_3F_8 ó CF_3I (según la versión del detector) en su interior. En la superficie exterior de las paredes, se encuentran pegados *transductores acústicos piezoeléctricos* que reciben la señal acústica emitida en el crecimiento de la burbuja [12,13]. Dicha señal se analiza en bandas de frecuencia hasta 150 kHz, donde esta tiene la mayor parte de su energía. A partir de ella y mediante diferentes correcciones por posición de burbuja, se extrae un parámetro acústico que permite discernir cada uno de los eventos e indagar en la distinción entre partículas conocidas respecto a otro tipo de partículas, por ejemplo, WIMP. Por su parte, 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*, está construyendo el detector de partículas *MODA-LS (Materia Oscura Detectada Acústicamente con Líquido Sobrecalentado)* basado en tecnología Géiser o cámara de condensación, que es una variante de la técnica del fluido sobrecalentado. En la siguiente *Figura 1* se observa, a la izquierda, una imagen de la vasija que contiene el fluido y los sensores acústicos pegados del detector PICO-2L [11], en el centro la cámara de burbujas del detector MODA-LS que contendrá el fluido y los sensores acústicos finales pegados a la misma y a la derecha el detector MODA-LS.

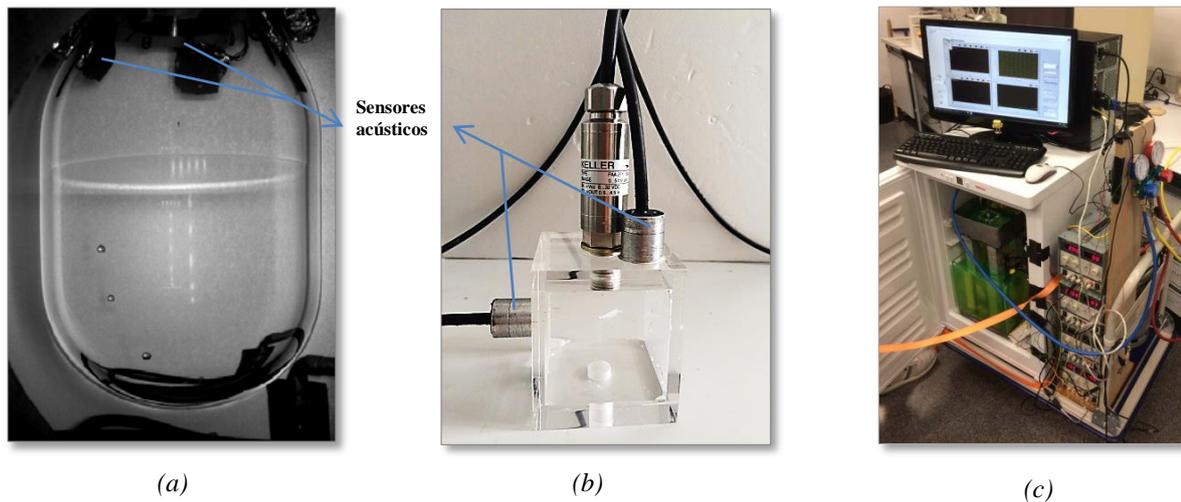


Fig. 1. (a) Cámara de burbujas detector PICO 2L. (b) Cámara de burbujas detector MODA-LS. (c). Detector de partículas MODA-LS.

En este detector, como bien se ha comentado, su objetivo es utilizar *sensores piezoeléctricos* con el fin de detectar la señal acústica emitida por el crecimiento de burbujas en el fluido sobrecalentado. Es por esto que, para este detector de partículas se realiza el presente estudio presente a lo largo de esta tesina, que parte de simulaciones y medidas experimentales para caracterizar y diseñar dos *sensores acústicos piezoeléctricos* que irán pegados en la parte exterior de una vasija (cámara de burbujas) que contiene en su interior el fluido sobrecalentado R134a.

Esta tesina presenta cuatro capítulos que muestran el proceso de simulación y diseño de los *sensores acústicos piezoeléctricos*, que consiste en el estudio de métodos analíticos y numéricos utilizando los software Matlab y COMSOL Multiphysics, que tratarán aspectos como el medio donde se genera la señal acústica, la elección de la cerámica piezoeléctrica, el efecto de la capa de adaptación de impedancias y por último, el encapsulado. Se presentan caracterizaciones acústicas de los sensores: las medidas de la *sensibilidad acústica (RVR)* y *admitancia eléctrica*, tanto de forma numérica y analítica como métodos experimentales a través de distintas formas de calibración acústica para luego poder contrastar los resultados. Todo esto con el fin de optimizar la señal transitoria de banda ancha que reciben los sensores acústicos en el rango de bajas frecuencias, hasta el orden de los ~ 150 kHz para el detector de partículas MODA-LS.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar y construir dos sensores acústicos piezoeléctricos para la detección de partículas, mediante el estudio de cada una de sus partes y caracterizarlos a través de las magnitudes más importantes que definen un transductor, como son su admitancia eléctrica y su sensibilidad acústica (RVR).

Objetivos específicos

- Comprender a través de estudios de modelos numéricos y analíticos las diferentes partes para el diseño del sensor acústico piezoeléctrico y saber comparar estos modelos para ver que tanto se aproximarán a las medidas experimentales.
- Realizar distintos montajes experimentales de los métodos de caracterización del sensor como son la admitancia eléctrica y la sensibilidad acústica (RVR) a través de calibraciones.
- Analizar los resultados experimentales obtenidos, compararlos con los estudios de los modelos analíticos y numéricos y poder concluir cuáles serán las mejoras desarrolladas para un funcionamiento óptimo de los dos sensores diseñados.

Organización del trabajo

El **Capítulo II**, presenta un estudio inicial de todas las partes que conforman el sensor acústico a diseñar, a través de modelos numéricos y analíticos, para presentar un análisis que contraste los resultados de estos dos tipos de modelos y ver qué se espera de cada parte. Estos estudios se llevan a cabo en diferentes subcapítulos divididos según las partes del sensor acústico como son: medio de recepción, siendo el fluido R134a donde se expone una breve descripción de dicho medio presente en el interior de la cámara de burbujas. A continuación se estudian los modos presentes en la cámara en tres casos (cámara emisora con burbujas, cámara emisora sin burbujas y cámara completa). En el apartado de cerámicas piezoeléctricas, se explica la elección de la cerámica y se realiza un estudio de los modos y la sensibilidad acústica (RVR). En el punto, capas de adaptación de impedancia acústica (matching layer), se describe la importancia de las mismas y la influencia de ellas en la mejora de la sensibilidad. Finalmente en el apartado de encapsulado, se presenta una descripción de la importancia del mismo y los pasos para la construcción del sensor. Vale la pena resaltar que en este capítulo no se presentan medidas experimentales, solo modelos para ver que se espera de cada una de las partes.

El **Capítulo III**, describe distintos métodos para caracterizar al sensor acústico piezoeléctrico a través de las dos magnitudes más importantes que los describen como son la admitancia eléctrica y la sensibilidad acústica (RVR), posteriormente se presenta un primer montaje experimental para las medidas de cerámicas y sensores libres, un segundo para las medidas de sensores pegados: estudio con chispas y por último, medidas de sensores pegados: estudio con hidrófono emisor.

El **Capítulo IV**, presenta todos los resultados obtenidos en los capítulos anteriores contrastando tanto los modelos analíticos y numéricos con las medidas experimentales. Se exponen los resultados de las distintas configuraciones tales como cerámicas y sensores libres, sensores pegados: estudio con chispas, sensores pegados: estudio con hidrófono emisor.

II. PARTES DEL DISEÑO DEL SENSOR ACÚSTICO

Para el diseño del sensor acústico del detector de partículas MODA-LS, se estudian en este trabajo las siguientes partes que lo componen en la siguiente *figura 2*:

1. El **medio** donde se genera la señal acústica, siendo el fluido R134a (1,1,1,2-Tetrafluoroetano).
2. Una **cerámica** piezoeléctrica que se adapte a las características de la señal acústica generada.
3. La **capa de adaptación** (matching layer), 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.
4. El **encapsulado** (housing) fabricado con un material de aluminio.

A continuación se muestran las partes del sensor en diferentes fases del desarrollo del mismo. En las siguientes secciones se describen los estudios realizados en la elección y caracterización de cada uno de sus componentes que dan lugar al diseño completo del sensor acústico.

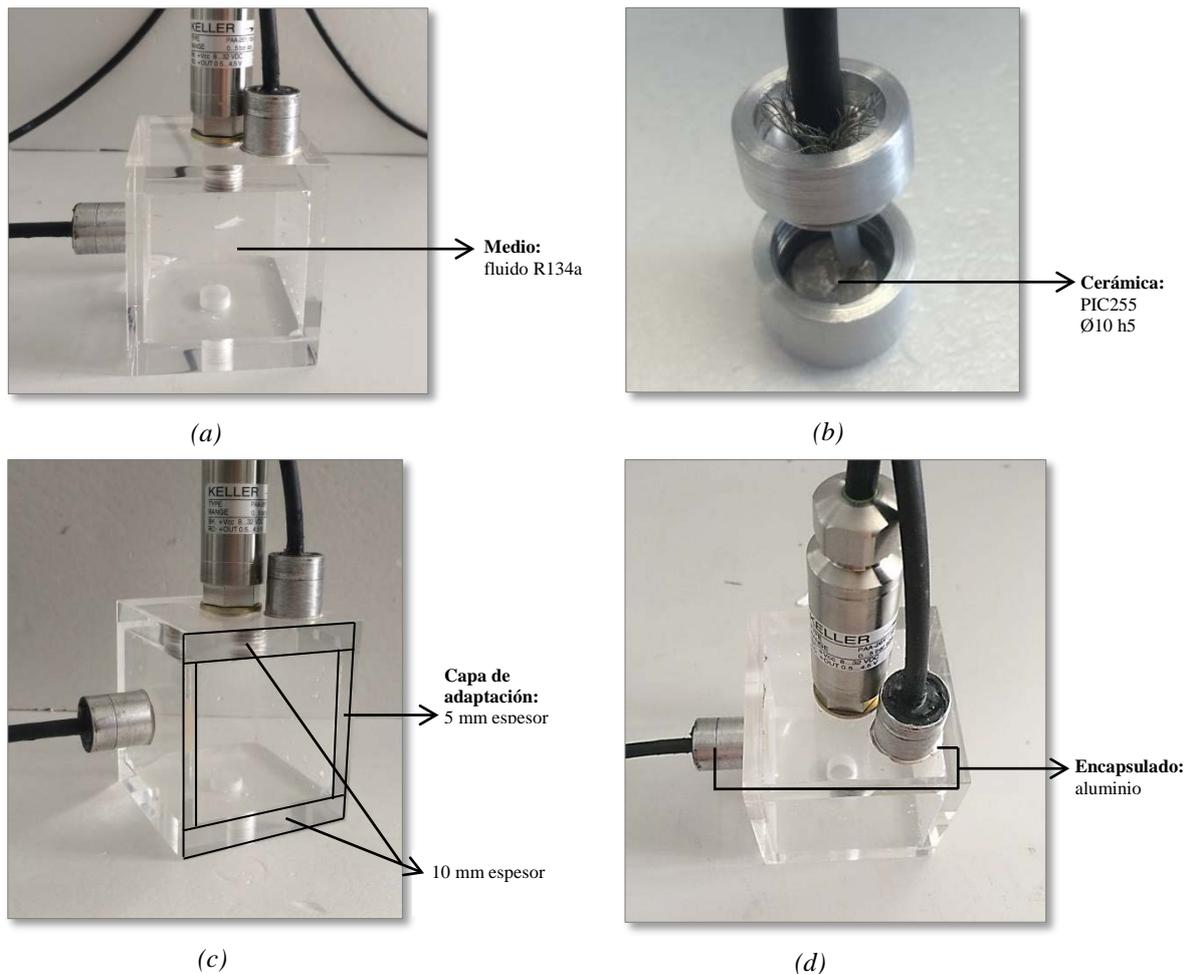


Fig. 2. Partes del sensor. (a) Medio: fluido R134a. (b) Cerámica: PIC 255 Ø10 h5. (c) Capa de adaptación: 5 y 10 mm espesor (d) Encapsulado: aluminio

II.1 Medio de recepción: interior de la cámara de burbujas

II.1.1 Breve descripción del medio: fluido R134a

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]. Como se ha comentado en la Introducción, el objetivo es que al igual que los detectores PICO, en el detector MODA-LS la señal acústica emitida en el crecimiento de la burbuja se analice en bandas de frecuencia hasta 150 kHz, donde la señal tiene la mayor parte de su energía.

Entre los diferentes estudios realizados en este Capítulo, se llevará a cabo un estudio acústico sobre el comportamiento de los modos en el interior de la cámara de burbujas del detector MODA-LS, que consiste en dos cámaras paralelepípedicas de metacrilato unidas por un tubo flexible, que contienen al fluido en dos estados de agregación distintos: la inferior en estado líquido y la superior en estado gaseoso. Tal como se muestra en la siguiente *figura 3*.

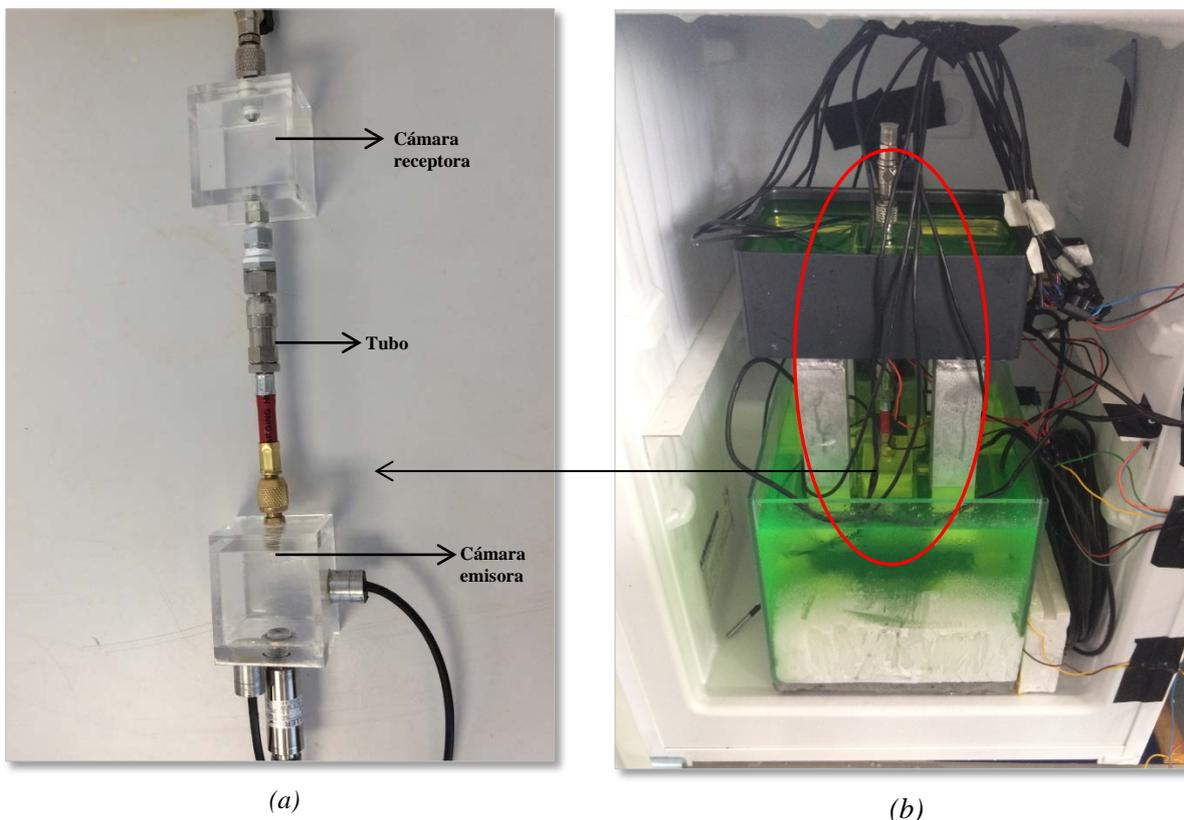


Fig. 3. Montaje de la cámara de burbujas. (a) partes de la cámara de burbujas. (b) cámara de burbujas en el detector MODA-LS.

Las propiedades del líquido sobrecalentado (cámara inferior) en las condiciones de trabajo del detector que se han estudiado, son las obtenidas de la base de datos NIST REFPROP [14].

Presiones de trabajo [bar]	Velocidad del sonido [m/s]	Densidad [kg/m ³]
1	737.7	1374
2	668.3	1328
3	622.3	1295

Tabla 1. Velocidades del sonido y densidades del líquido para diferentes presiones de trabajo.

Todos los procesos acústicos se desarrollan en la cámara inferior; tales como la generación, crecimiento de la burbuja y consecuente emisión acústica. Para estudiar de forma pormenorizada el comportamiento acústico de dicha cámara, se realiza un *estudio de modos* de dos formas distintas: libre, sin considerar la fuente; y forzada, para una burbuja de varios tamaños y ubicada en distintas posiciones, tal como se verá en las siguientes secciones. Además, 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 también un estudio de modos adicional con el sistema completo (cámara de burbujas).

Estos *modos propios* son aquellas ondas estacionarias que se generan en el interior de un determinado espacio cerrado. Este tipo de ondas vienen dadas por la interacción entre las ondas incidentes y reflejadas dentro del volumen determinado [15]. Así mismo, cada modo propio está asociado a una frecuencia, llamada *frecuencia propia*, y a un nivel de presión sonora específico en función del punto a considerar (*valores propios* del problema acústico). Como ejemplo, si la distancia entre dos paredes paralelas dentro de un espacio es múltiplo par de media longitud de onda de una determinada frecuencia, se puede decir que ésta se trata de un modo propio y por tanto, permanecerá estacionaria reflejándose entre las dos superficies paralelas, perdiendo paulatinamente energía acústica.

A continuación, se desarrolla el estudio numérico y analítico de modos, para diferentes configuraciones de cámara, respecto a su comportamiento en frecuencias y presiones en cada uno de los casos.

II.1.2 Modelo numérico

Preprocesado

Dependiendo de la ausencia o presencia de partículas o burbujas a detectar, se realiza el estudio de los modos en tres casos, empleando para ello un modelo en 3D del software COMSOL Multiphysics en el módulo de estudios de frecuencias propias [16]. Este módulo permite analizar la distribución de modos en el sistema con o sin burbuja. La configuración de todas las simulaciones son las siguientes:

- Frecuencias de interés y mallado: como se comentó anteriormente, cuando se crea una burbuja el tiempo transcurrido es relativamente corto, generándose una señal impulsiva de gran ancho de banda donde su mayor parte de la energía se encuentra comprendida desde muy baja frecuencia hasta los 150 kHz. Este estudio abarcará hasta los 50 kHz por limitaciones del equipo de simulación y, como se verá, la mayor variación de modos se encuentran en bajas frecuencias.

Se establece un mallado determinado por la física de tipo normal visto en la *figura 4*, debido a limitaciones de las características del equipo utilizado para las simulaciones. Sin embargo, este mallado es suficiente para un estudio como el que se desea obtener, resultando suficiente el tamaño del elemento de malla empleado $\Delta x = \lambda / 8$.

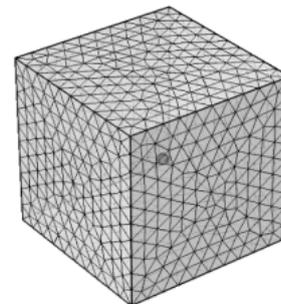


Fig. 4. Ejemplo de mallado resultante de la cámara inferior para uno de los casos estudiados.

- Condiciones de contorno:
 - Presión acústica: se aplica a todo el dominio de la cámara.
 - Valores iniciales: estos permiten que cierta presión acústica inicial se mantenga en los dominios. Para este estudio, todos los valores iniciales se encuentran en 0.
 - Condición de pared rígida: se aplica a las seis caras del contorno.
 - Aceleración normal: cuando procede, se aplica a la superficie de las burbujas emisoras.

Caso 1. Cámara emisora sin burbuja. Se basa en el estudio de modos de la cámara inferior en ausencia de burbujas como se aprecia en la siguiente *figura 5*, conteniendo R134a en estado líquido en las tres condiciones termodinámicas, dadas por las presiones de 1, 2 y 3 bares de trabajo.

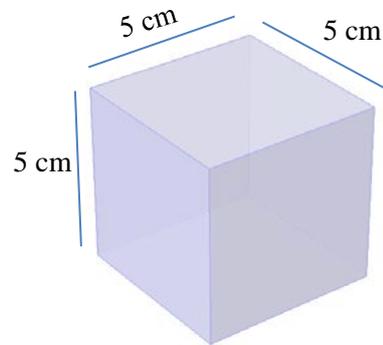


Fig. 5. Geometría paralelepípedica de la cámara emisora.

Caso 2. Cámara emisora con burbuja. Se realiza un estudio en la misma cámara emisora con el fluido R134a en estado líquido situando en su interior, inicialmente, una burbuja de 1 mm de diámetro en dos posiciones diferentes (A y B de *figura 6*). Posteriormente, se hace un análisis similar al anterior pero con una burbuja de 3 mm de diámetro. Todo esto con el fin de estudiar si existen cambios considerables en la variación de los modos al introducir una fuente acústica (la burbuja) en su interior.

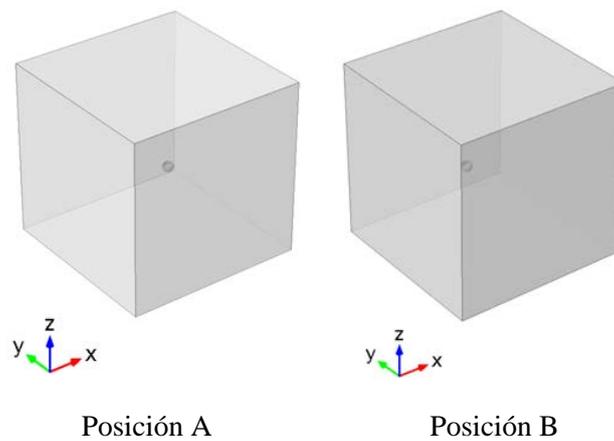


Fig. 6. Posiciones de burbujas en el interior de la cámara emisora. Posición A: centro de la cámara. Posición B: ($x=1.5$ cm, eje $y=2$ cm, eje $z=4$ cm).

Caso 3. Cámara completa. Se realiza un estudio de toda la cámara, es decir, la cámara emisora que contiene el fluido R134a en estado líquido y la receptora que contiene el mismo fluido R134a en estado gaseoso, así como con el tubo que las une.

La geometría del sistema completo como se presenta en la *figura 7*, consta de dos cámaras paralelepípedicas (cúbicas) acopladas de 5 cm de lado en la parte interna, 1 cm de espesor de metacrilato en la tapa inferior y superior, y 5 mm de espesor de metacrilato en las paredes laterales; conectadas mediante un tubo cilíndrico de 16.5 cm de longitud y 1 cm de diámetro, en posición vertical. En los casos de simulación con burbujas, se emplearán esferas de 1 mm y 3 mm de diámetro. Así, la geometría simulada, abarca tanto el interior del sistema de detección como el exterior.

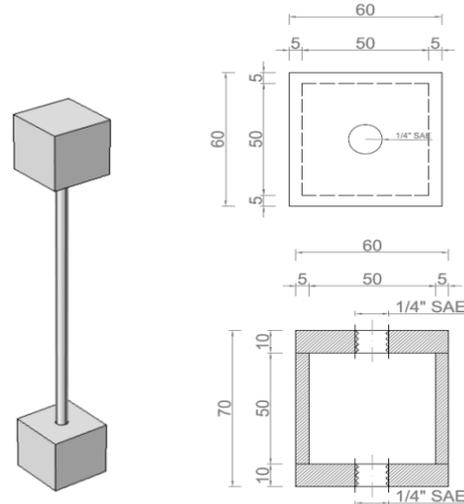


Fig. 7. Geometría de la cámara de burbujas, escala 1:100.

Procesado

En todos los modelos de simulación de física de acústica, la presión p_t es la única variable dependiente. En COMSOL, la EDP (ecuación de derivadas parciales) dominante depende del tipo de estudio seleccionado, en este caso vendrá regido por la siguiente ecuación:

$$-\frac{\nabla}{\rho} (\nabla p_t - q_d) - \frac{p_t}{\rho} = Q_m \tag{1}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, k es el número de onda. Los valores correspondientes asociados al fluido se han introducido manualmente. Los parámetros q_d y Q_m son las fuentes dipolo y monopolo acústico respectivamente. Estas fuentes no están presentes en este trabajo, de modo que la EDP se simplifica. La *figura 8*, muestra un ejemplo del campo de presiones obtenido para uno de los modos resultantes de la cámara inferior sin burbuja.

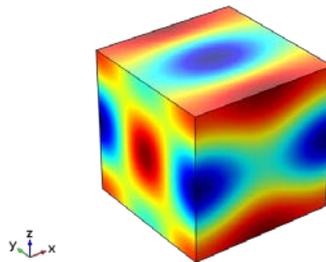


Fig. 8. Ejemplo de presión acústica resultante en cámara emisora a 17.6 kHz

Postprocesado

En cada uno de los casos, se estudia la presión acústica generada tanto en el interior del fluido como en la parte exterior de las paredes de metacrilato, definiendo en COMSOL parámetros como la *presión máxima*, la *presión promedio*, y la *desviación típica*; este último parámetro es un operador que integra la presión sobre el dominio de la geometría creada, trabaja de forma global con el fin de poder integrar la geometría del modelo en cualquier lugar y se emplea para determinar cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio en la distribución de los valores.

II.1.3 Modelo analítico

Como el estudio de los modos propios depende de la geometría y las dimensiones de la cámara de burbujas, se comprueba la validez de los resultados obtenidos en la simulación con la siguiente expresión analítica [15].

$$f(m, n, k) = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_m}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_n}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{L_k}\right)^2} \quad (2)$$

Donde m , n y k son números naturales, y L_m , L_n , L_k son las dimensiones del paralelepípedo. Consecuentemente, cada posible combinación de valores m , n y k dará lugar a una frecuencia y modo propio asociado específico.

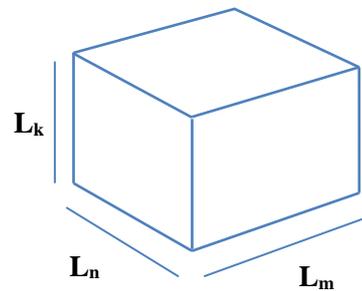


Fig. 9. Paralelepípedo típico para estudio analítico de modos.

II.1.4 Análisis del medio de recepción (estudio de casos)

Caso 1: cámara emisora sin burbuja

Para demostrar la validez de los resultados, se representan en la siguiente *figura 10*, las frecuencias propias simuladas frente al número de modo en orden creciente de frecuencia, y se comparan con las frecuencias propias obtenidas analíticamente (2).

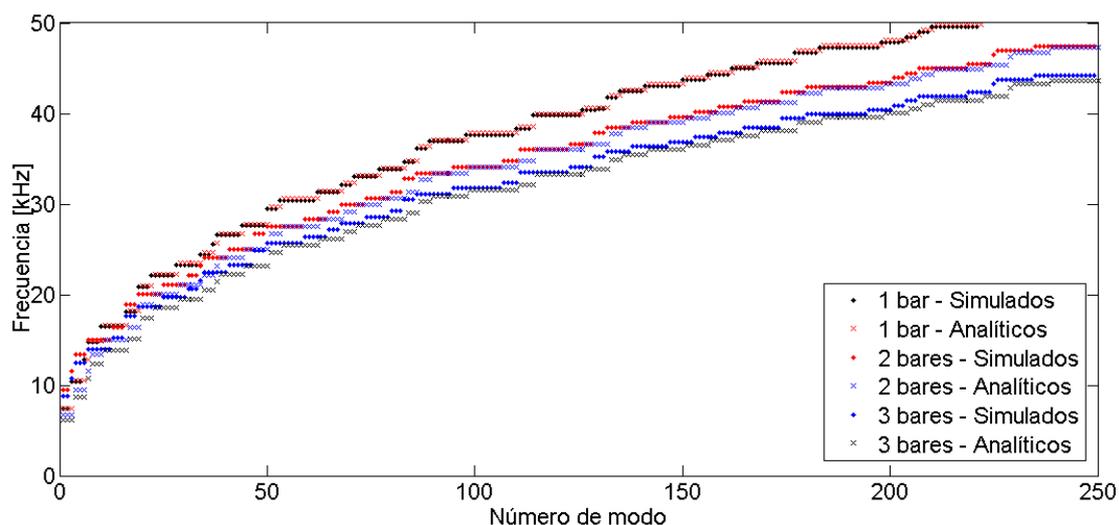


Fig. 10. Modos propios analíticos vs. numéricos (simulados) para las presiones de trabajo de 1, 2 y 3 bares.

Se observa que los resultados simulados y analíticos presentan una diferencia mínima en las tres presiones de trabajo.

Conforme aumenta la presión, las frecuencias de los modos resultantes decrecen manteniéndose el número de los mismos. Con ello, se afirma que la cámara emisora será más sensible para bajas frecuencias cuanto mayor sea la presión de funcionamiento del sistema. Como se vió en la *Tabla 1*, a mayor presión de trabajo, menor velocidad de propagación del sonido; Luego, como la frecuencia y velocidad de propagación son directamente proporcionales (2), el resultado es el esperado. También se observa que al tener la cámara una geometría paralelepípedica, hay casos en los que aparecen tres o más modos en la misma frecuencia (multiplicidad de modos), dado que la onda acústica se comporta de la misma forma en las tres dimensiones espaciales.

A continuación se representa en la *figura 11*, para todo el rango de frecuencias y cada presión de estudio del detector, el valor de la presión acústica media y máxima en el interior de la cámara en cuestión.

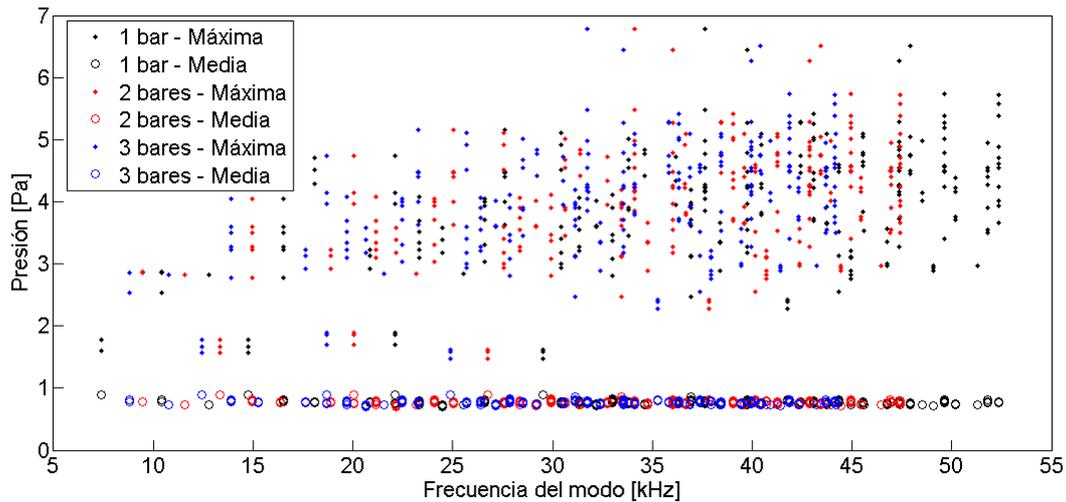


Fig. 11. Presión acústica máxima y promedio en función de los modos propios para presiones de trabajo del detector estudiadas de 1, 2 y 3 bares.

Se observa que los valores máximos presentan una gran variabilidad, sobre todo a frecuencias mayores, mientras que el promedio se mantiene constante en torno a una presión de ~ 0.79 Pa en todos los modos.

Caso 2: cámara emisora con burbuja

Una vez conocidas las consecuencias de la variación de la presión acústica respecto a la presión de trabajo del detector en la cámara sin burbujas, se continúa con el estudio de la influencia de la posición en donde se genera la burbuja en la cámara emisora, pero únicamente para una presión de trabajo teniendo en cuenta que para las tres presiones se presentan variaciones mínimas. Por ello, en los siguientes casos se realizan los estudios a la presión de 2 bares.

Se colocan, en estudios diferentes, dos burbujas de 1 mm y 3 mm de diámetro en dos posiciones distintas analizándolas de forma independiente, tal como se muestra en la *figura 12*.

Para la *posición A* de burbuja, se realiza una comparación de modos en la siguiente *figura 12* y presiones acústicas máximas y promedios respecto al caso sin burbuja como se observa en la *figura 13*.

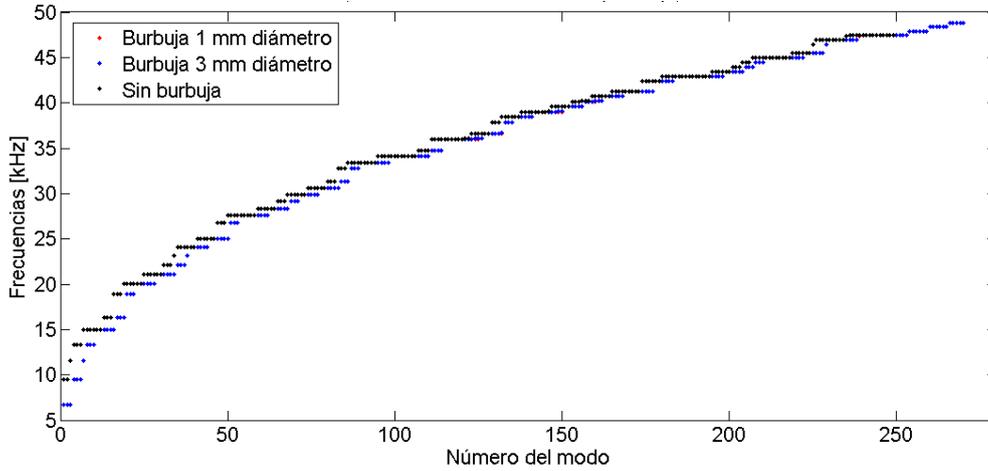


Fig. 12. Distribución de modos en cámara emisora: sin y con burbujas de 1 mm y 3 mm de diámetro en posición A.

Se observa que para ambas burbujas, las curvas se solapan, y presentan un pequeño desplazamiento hacia la derecha respecto a la curva sin burbuja. Por lo tanto, se puede afirmar que representan la misma información, por lo que la presencia de burbujas no es influyente para los diámetros que estamos considerando. Esto era de esperar dado que el tamaño de las mismas es muy inferior a las longitudes de onda de los modos resultantes. En efecto, para la frecuencia más baja obtenida ($f \approx 7$ kHz), la longitud de onda para la presión de 2 bares ($c = 668.3$ m/s) es de $\lambda = c / f \approx 95$ mm, es decir, mucho más grande que el tamaño de las burbujas de estudio (1 y 3 mm).

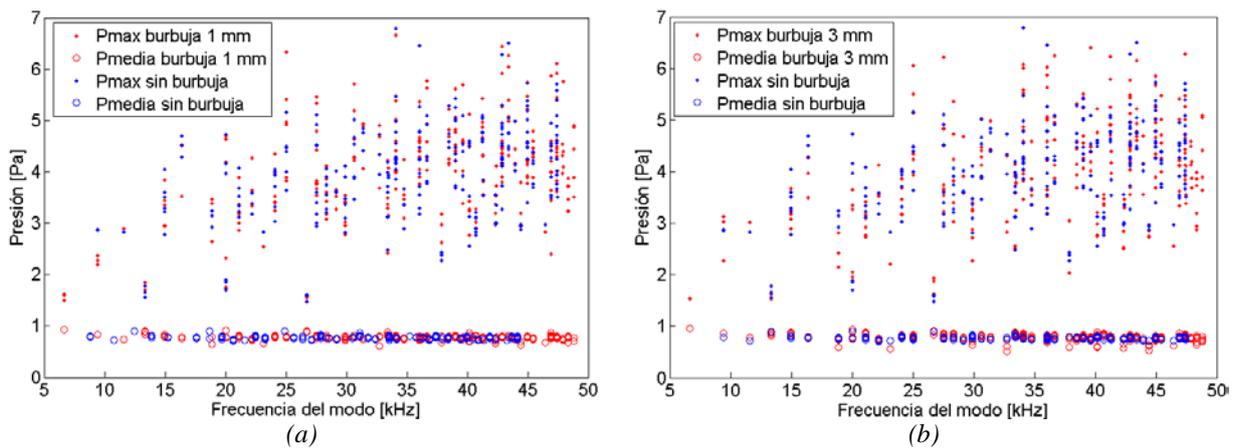


Fig. 13. Presión acústica en cámara emisora. (a) sin burbuja vs. con burbuja de 1 mm de diámetro en posición A. (b) sin burbuja vs. con burbuja de 3 mm de diámetro en posición A.

En cuanto al comportamiento de las presiones acústicas en ambos diámetros de burbuja estudiados, no se observa una variación apreciable de los valores promedio, permaneciendo en torno a una presión de 0.9 Pa; sin embargo, hay cierta mayor variabilidad para los valores máximos.

Para la *posición B* de burbuja, se realiza una comparación de modos en la siguiente *figura 14* y presiones acústicas máximas y promedios en la *figura 15* respecto al caso sin burbuja.

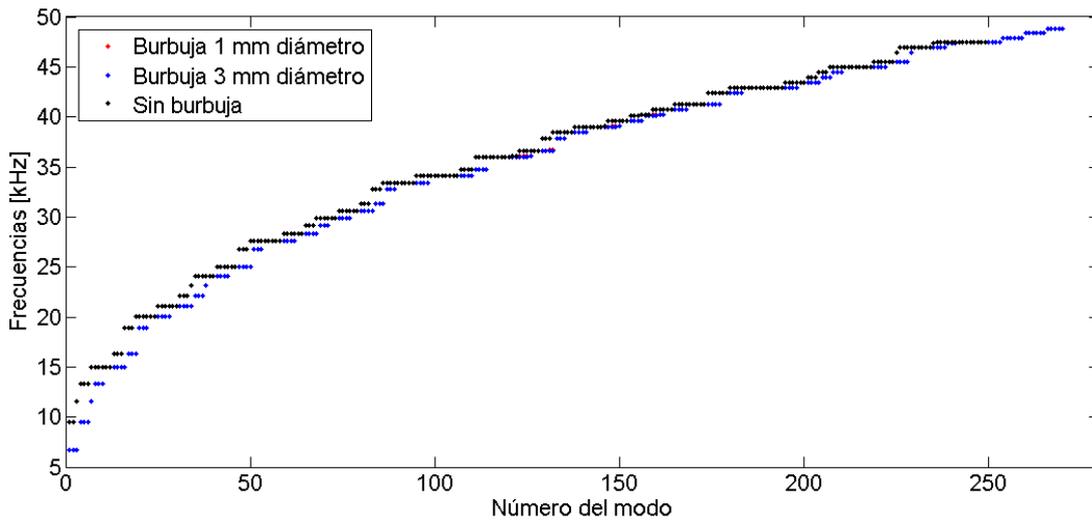


Fig. 14. Distribución de modos en la cámara emisora: sin burbuja, con burbujas de 1 mm y 3 mm de diámetro en posición B.

Comparando las gráficas obtenidas de la anterior *figura 14* de las burbujas de 1 mm y 3 mm de diámetro, se observa que las curvas se solapan, es decir, la distribución de los modos no se ve afectada por el tamaño de las burbujas. Sin embargo, comparándolas con la curva *sin burbuja*, estas se encuentran desplazadas hacia la derecha respecto al número del modo, compartiendo así las mismas frecuencias.

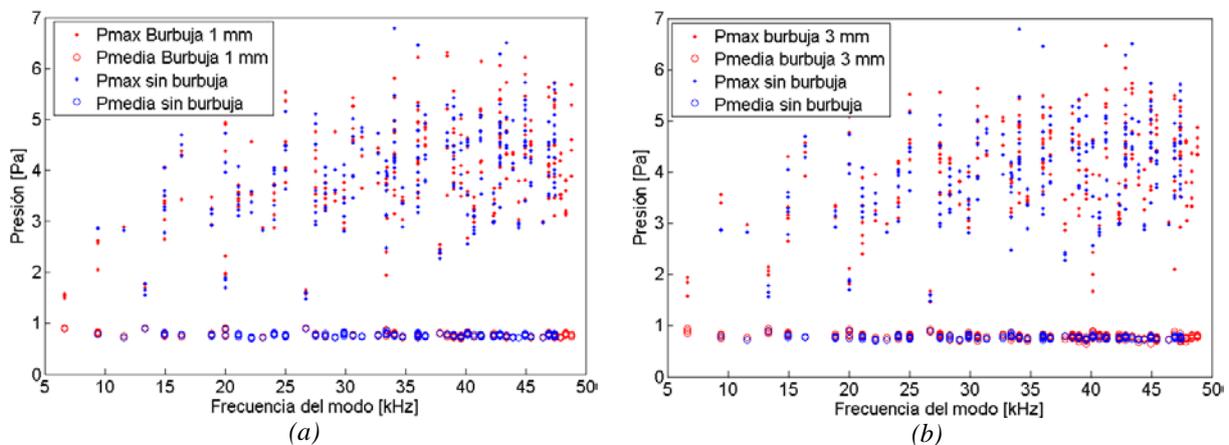


Fig. 15. Presión acústica en recipiente emisor. (a) sin burbuja vs. con burbuja de 1 mm de diámetro en posición B. (b) sin burbuja vs. con burbuja de 3 mm de diámetro en posición B.

En ambos tamaños de burbuja ocurre algo similar al caso de la *posición A*, es decir, hay una mayor variabilidad en la presión máxima mientras que la presión promedio permanece constante en torno a una presión de 0.9 Pa.

Con todo lo anterior, se puede afirmar que la influencia de la burbuja para los tamaños estudiados así como para cualquier posición de la misma, es despreciable; por lo tanto, el estudio de modos de la cámara emisora para un detector de estas características se puede realizar en condiciones de oscilación libre, es decir, sin la presencia de la burbuja.

Caso 3: cámara de burbujas completa

En la siguiente *figura 16*, se representan los modos propios teniendo en cuenta no sólo el interior de la cámara sino también las paredes de metacrilato de las mismas, es decir, del diseño final del detector. Además, se estudia la desviación típica de la cámara emisora y toda la cámara completa con y sin paredes de metacrilato *en las figuras 17 y 18* para estudiar el efecto de dichas paredes en los modelos.

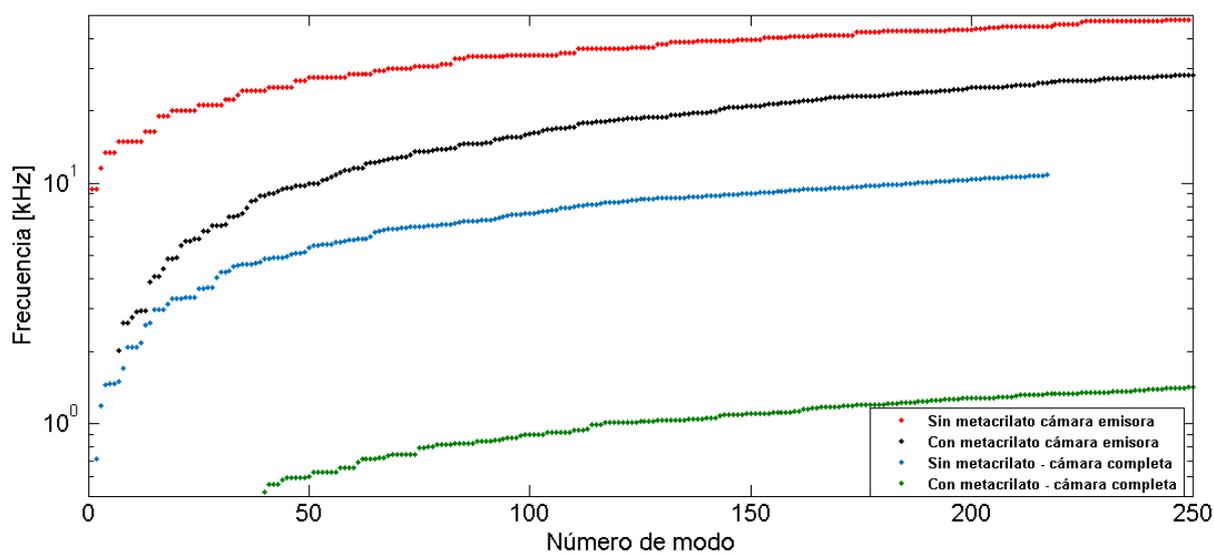


Fig. 16. Comparación distribución de modos en varias configuraciones de la cámara de burbujas.

A la vista de los resultados representados en la *figura 16*, se observa 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 kHz hasta 2 kHz y se alcanza una frecuencia máxima de 47 kHz 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 Hz hasta 516 Hz, y la frecuencia máxima que se alcanza es de 10 kHz y 1.4 kHz respectivamente.

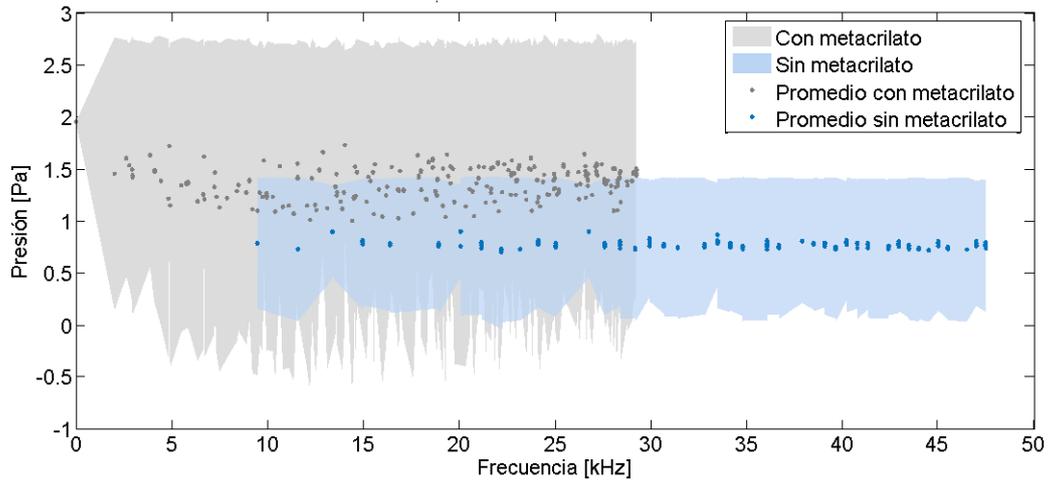


Fig. 17. Desviación típica y promedio, cámara emisora sin metacrilato vs. con metacrilato.

Se puede ver en la *figura 17* para la cámara emisora con metacrilato, que la desviación es mayor en comparación a la misma sin metacrilato, esto se debe a que hay un mayor grado de dispersión de los datos promedios, respecto a la cámara sin metacrilato. La presencia del metacrilato, hace que exista un aumento tanto de bajas frecuencias como de presiones respecto a la cámara emisora sin metacrilato.

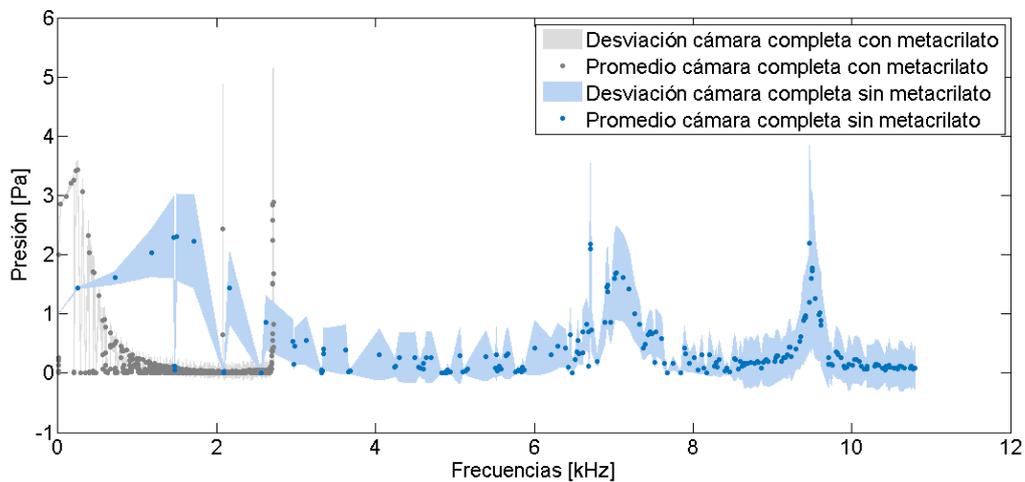


Fig. 18. Desviación típica y promedio, cámara completa sin metacrilato vs. con metacrilato.

Por último, en el estudio de la cámara completa con metacrilato *figura 18*, se nota una disminución hacia las bajas frecuencias que va 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; para las frecuencias de 6.7 kHz y 9.5 kHz, existe un aumento considerable en la presión de 2.2 Pa respectivamente.

II.2 Cerámicas piezoeléctricas

II.2.1 Elección de la cerámica y estudios de los modos

Entre los años 1940 y 1950 se empieza la búsqueda de materiales piezoeléctricos sintéticos [17] llegando al descubrimiento de las cerámicas piezoeléctricas de Titanato de Bario y las cerámicas piezoeléctricas de Titanato Zirconato de Plomo (PZT) en los EUA [18,19]. Estos materiales presentan mejores propiedades que los cristales después de su polarización y permiten dimensiones y geometrías flexibles. En la actualidad las cerámicas piezoeléctricas PZT, son las que más predominan en el mercado. Los dos tipos de cerámicas existentes se clasifican en: *cerámicas blandas y duras*. Entre ellas, las cerámicas blandas son comúnmente utilizadas para la construcción de sensores piezoeléctricos dado que son fáciles de polarizar debido a su comportamiento ferroeléctrico y su alta movilidad [20]. Poseen altos factores de acoplamiento y son empleadas en sensores de vibración, transmisores y receptores ultrasónicos de flujo, se utilizan en aplicaciones de micro y nano posicionamiento y en aplicaciones de electroacústica [21,22]. Las cerámicas duras soportan altos niveles de excitación eléctrica y se utilizan en los transductores de alta potencia.

De acuerdo a estudios de caracterización de cerámicas realizados anteriormente por el Grupo de investigación en *Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas* en relación al tipo de cerámica adecuada para ser empleada en el detector de partículas MODA-LS, se encuentra que la PIC 255 Ø25 mm y 2 mm de espesor, PIC 255 Ø10 mm y 2 mm de espesor, PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor, PIC 155 Ø10 mm y 5 mm de espesor, todas clasificadas como cerámicas tipo blandas, presentaron buenas respuestas hacia las características deseadas [23]; sin embargo, después de un estudio específico [24] se escoge la cerámica **PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor** ya que su sensibilidad es mayor en comparación con las mencionadas anteriormente, y es semejante a las que se utilizan en los detectores PICO [25]; además, presentan un menor tamaño para ser ubicadas en la cámara de burbujas de dimensiones geométricas también pequeñas, por lo tanto se podría llegar a ubicar hasta 4 sensores en el detector MODA-LS. En esta cerámica se obtiene un mejor comportamiento de la sensibilidad en el rango de frecuencias deseado hasta ~ 150 kHz. La *figura 19* muestra una fotografía de la cerámica PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor.

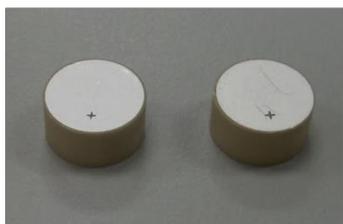


Fig. 19. Cerámica PIC 255 Ø10 mm y espesor de 5 mm.

Las cerámicas piezoeléctricas poseen ciertas frecuencias características en las que resuenan libremente con una mayor amplitud que otras frecuencias, llamadas frecuencias de resonancia f_r , correspondientes a los modos de vibración de las mismas. Dichos modos también vienen acompañados de una frecuencia de antiresonancia f_a , donde la admitancia presenta una amplitud de oscilación máxima. Las medidas de estas frecuencias características proporcionan la información para obtener las propiedades piezoeléctricas de la cerámica [26]. En la siguiente *figura 20*, se presenta una curva de resonancia típica de la admitancia contra frecuencia, para una cerámica cerca de su resonancia. Se observa la frecuencia de resonancia f_r en el punto de admitancia máxima y la frecuencia de antiresonancia f_a , en el punto mínimo.

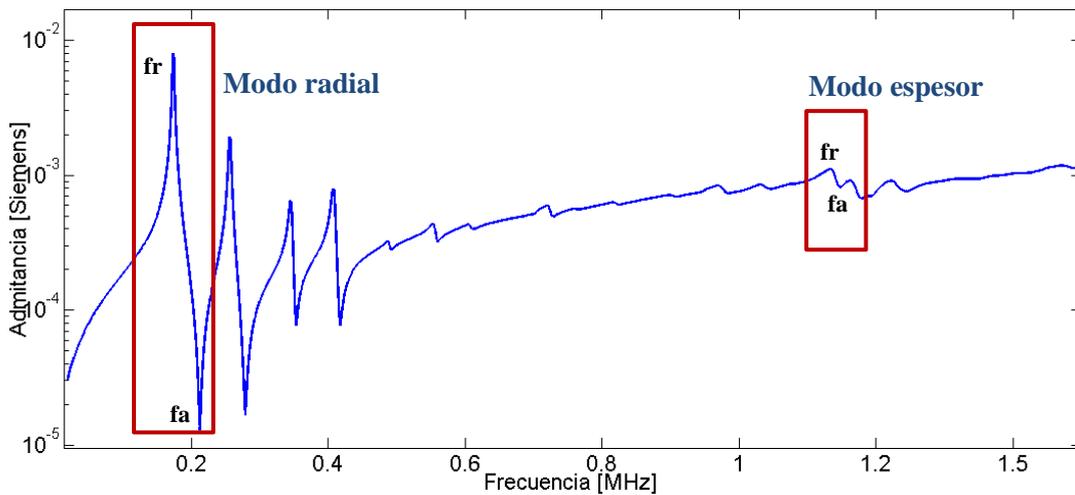


Fig. 20. Ejemplo, gráfica de admitancia de una cerámica PIC 255. Se observan las frecuencias de resonancia y antiresonancia para el modo radial y modo espesor.

La cerámica **PIC255 Ø10 mm y 5 mm de espesor**, presenta modos propios asociados a una vibración radial y longitudinal determinados por su geometría, sus propiedades mecánico-elásticas y la dirección de polarización [27]. Donde la condición de vibración radial, está dada porque el diámetro sea diez veces más grande que el espesor del disco, esta vibración se da desde el centro del disco hacia el exterior [28] y para vibraciones longitudinales el diámetro de la cerámica debe ser al menos 2.5 veces más pequeño que el espesor [28].

La siguiente *figura 21*, muestra de forma idealizada, la vibración de la cerámica en modo radial y espesor de acuerdo a la gráfica de la *figura 20* de la admitancia en función de la frecuencia. Hasta la frecuencia de 250 kHz, hay presencia del modo radial.



Fig. 21. Modos de vibración en cerámicas cilíndricas piezoeléctricas. (a) radial o planar (b) en espesor.

II.2.2 Modelo numérico

Preprocesado

- Geometría: el estudio de este modelo, se realiza a través del software COMSOL Multiphysics. Se trata de un cilindro de 10 mm de diámetro y 5 mm de espesor, tal como se muestra en la figura 22. La cerámica está polarizada según el eje longitudinal, siendo las caras superior e inferior donde se conectarán los electrodos. [29].

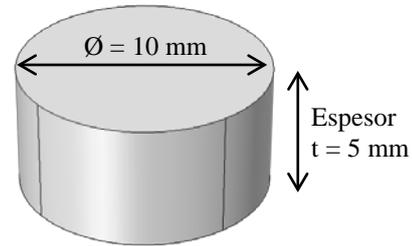


Fig. 22. Geometría de la cerámica.

- Frecuencias de interés y mallado: con el propósito de visualizar los picos de admitancia tanto del modo radial como en espesor, se realiza un barrido desde 100 Hz hasta 1 MHz, en pasos de 100 Hz. A pesar de que este rango se excede del esperado para el estudio de la señal acústica de burbujas, con él tenemos una mayor visualización acorde a los resultados numéricos con los medidos. Para cada frecuencia, el mallado se discretiza en segmentos de un octavo de la longitud de onda correspondiente: $\Delta x = \lambda/16$. Ver figura 23.

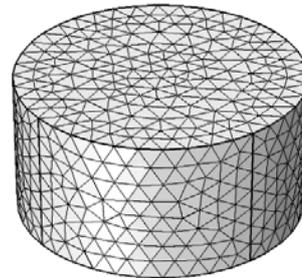


Fig. 23. Mallado de la cerámica.

- Condiciones de contorno: a continuación, se describen las diversas características y condiciones que se aplican al modelo estudiado:
 - Libre: es la condición de contorno mecánica, que se aplica a todos los límites del dominio de la cerámica cuando esta se encuentra de forma libre, es decir, que no está pegada a la cámara de burbuja.
 - Carga nula: condición de contorno electrostática por defecto, que no presenta carga eléctrica en el límite, por lo que se aplica a la superficie lateral sin electrodos de las cerámicas.
 - Valores iniciales: estos permiten introducir un desplazamiento inicial del campo acústico, del potencial eléctrico o sus derivadas. Todos los valores iniciales se fijan en 0 y se aplica a toda la geometría.
 - Simetría axial: es una condición de contorno por defecto que se utiliza para obtener dicha simetría. Se establece en el eje longitudinal de la cerámica.
 - Potencial eléctrico: establece el potencial eléctrico a un valor de 1 V en uno de los electrodos.

- Tierra: establece el potencial eléctrico a cero en el límite que se aplica a la otra superficie del electrodo [29].

Después de algunos estudios previos en simulaciones 3D, y comparación de los resultados con modelos 2D axisimétrico, se decide realizar las simulaciones de la cerámica dentro del medio en simetría 2D (debido a que el tiempo de simulación es mucho más rápido y el sistema presenta simetría axial), tal como se observa en la siguiente *figura 24*, que describen algunas de las anteriores condiciones de contorno.

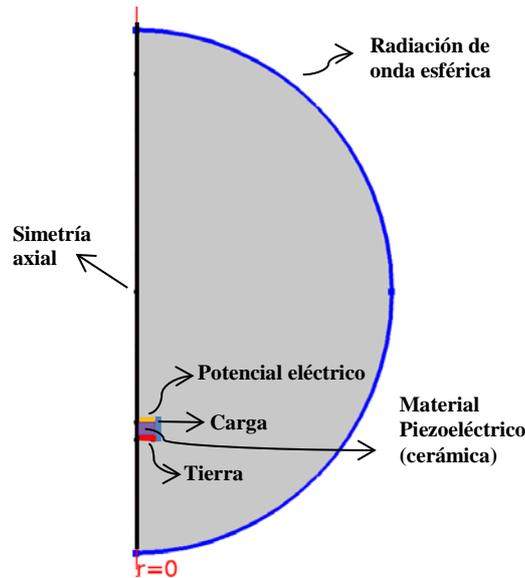


Fig. 24. Condiciones de contorno para la cerámica PIC 255 $\varnothing 10$ mm y 5 mm de espesor simulada en COMSOL.

Procesado

Los parámetros de entrada son los coeficientes de la matriz de elasticidad, la matriz de acoplamiento, la matriz de permitividad, la densidad y las pérdidas tanto mecánicas y dieléctricas, respectivamente. Para el desarrollo de este modelo numérico se utiliza el estudio en el dominio de la frecuencia, donde el campo de desplazamiento y el potencial eléctrico pueden ser obtenidos por $\mathbf{u}(\mathbf{r},t) = \mathbf{u}_t(\mathbf{r})e^{i\omega t}$ y $V(\mathbf{r},t) = V_t(\mathbf{r})e^{i\omega t}$, donde \mathbf{u}_t y V_t satisfacen la siguientes ecuaciones [30,31]:

$$\begin{aligned} -\rho\omega^2 \mathbf{u}_t - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{F}_v e^{i\phi} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v &\leftrightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = V_t \end{aligned} \quad (3)$$

Se tiene que ρ es la densidad y $\boldsymbol{\sigma}$ es el esfuerzo. Los parámetros \mathbf{F}_v son una carga externa del cuerpo definida como la fuerza por unidad de volumen, y ϕ es su fase en el estudio del dominio de la frecuencia. El parámetro ρ_v es una densidad de carga espacial. Estas fuentes no están presentes en el modelo de esta tesina. Debido a que los materiales piezoeléctricos están polarizados en 3 direcciones, se define el sistema de coordenadas con el fin de coincidir con la dirección z en el sistema global.

También se considera el factor de amortiguamiento mecánico de la matriz de elasticidad, C^E , η_c^E y el factor de pérdida dieléctrico de la permitividad eléctrica de la matriz ϵ^S , η_E^S definidos como isotrópico.

Postprocesado

Como se comentará en el *Capítulo III*, tanto en las medidas de las cerámicas libres como de los sensores finales, se utilizan dos magnitudes para su caracterización: la *admitancia eléctrica* y la *sensibilidad acústica* en recepción (RVR, del inglés *Received Voltage Response*). Ninguna de estas magnitudes se pueden obtener directamente con COMSOL sin embargo, ambas se pueden calcular a partir de los resultados obtenidos.

- Impedancia eléctrica. A partir de la densidad de carga superficial hacia el interior en uno de los electrodos (J_n) y de la diferencia de potencial entre el electrodo con potencial prescrito y el conectado a tierra (V), la impedancia eléctrica se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{\int_S J_n dS} \quad (4)$$

Donde I es la intensidad de corriente a través del electrodo y la integral se extiende a toda la superficie S del electrodo. Definida de esta forma, la impedancia queda como un número complejo del que podemos obtener su módulo, fase, parte real e imaginaria. Dado que la impedancia es la oposición de los circuitos al paso de la corriente alterna, se presentarán las gráficas de la *admitancia eléctrica* que es la facilidad que ofrece un circuito al paso de la corriente, ya que desde un punto de vista práctico toda la información acerca del comportamiento de la frecuencia de resonancia de la cerámica está contenida en este valor y así poder compararla directamente con las medidas experimentales, tal como se verá en el *Capítulo IV*.

- Sensibilidad acústica (RVR). A partir del voltaje eléctrico V y del campo acústico p_R resultante a una distancia R de la cerámica (en campo lejano), podemos calcular la sensibilidad acústica lineal en emisión de la cerámica: $S_T = \frac{p_1 m}{V} = \frac{p_r R}{V}$. A partir de esta expresión, se puede calcular la sensibilidad lineal en recepción S_R mediante el parámetro de reciprocidad J [32] que, para un transductor recíproco cumple que: $J = \frac{S_R}{S_T} = -j \frac{2R}{\rho f}$, donde ρ , f y R son la densidad del medio, la frecuencia y la distancia entre emisor y receptor, respetivamente. Para ondas esféricas, la relación entre ambas sensibilidades viene dada por:

$$RVR = 20 \log_{10} \left(\frac{S_R}{V/\mu Pa} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{S_T}{\mu Pa/V} \right) - 294 - 20 \log_{10} \left(\frac{\rho}{kg/m^3} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{R}{m} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{f}{kHz} \right) \quad (5)$$

Introduciendo la sensibilidad en emisión para cada uno de los pasos frecuenciales simulados, se obtiene la sensibilidad en escala logarítmica, RVR, comúnmente utilizada.

II.2.3 Modelo analítico

Aunque las características de vibración de los materiales piezoeléctricos pueden ser determinadas por la elasticidad lineal, la ecuación de Maxwell y las ecuaciones constitutivas piezoeléctricas [23], es difícil obtener soluciones analíticas para incluso una geometría simple. Sin embargo, se emplean a continuación tres modelos analíticos sencillos: dos modelos en modo radial en 1D y en 3D, y un modelo en modo longitudinal en 1D para cerámicas tipo barras, también aplicable a cerámicas cilíndricas, presentando las ecuaciones de estos modos de resonancia comunes y los parámetros asociados a la misma. Aplicando un barrido frecuencial que va desde los 10 kHz hasta los 500 kHz en pasos de 1 kHz.

- Modelo en modo radial en 1D por Stewart Sherrit [33]

$$Y(\omega) = \left(\frac{-i\omega R^2 \varepsilon_{33}^p}{h} \right) \left[\frac{2(k^p)^2}{1 - \sigma^p - J(\omega R / (c_{11}^p / \rho)^{1/2})} - 1 \right] \quad (6)$$

- Modelo en modo radial en 3D por Chi Hung y Chien Ching [34]

$$Y(\omega) = i \omega \frac{2\pi R^2 V \varepsilon_{33}^T}{V(h)} \cdot \frac{\left[1 - \nu_p + (1 + \nu_p) \frac{k_p^2}{k_p^2 - 1} \right] J_1(\beta_3 R) - \beta_3 R J_0(\beta_3 R)}{(1 - \nu_p) J_1(\beta_3 R) - \beta_3 R J_0(\beta_3 R)}, \beta_3 = \rho s_{11}^E (1 - \nu_p^2) \omega^2 \quad (7)$$

- Modelo en modo longitudinal en 1D, por Stewart Sherrit [33]

$$Y(\omega) = \frac{i\omega A \varepsilon_{33}^S \left(\frac{\omega}{4f_p} \right)}{h \left(1 - k_{33}^2 \tan \left(\frac{\omega}{4f_p} \right) \right)} \quad (8)$$

Donde:

- ρ = densidad del medio. A = área de la cerámica. R = radio de la cerámica.
- ω = es la frecuencia angular. h = espesor de la cerámica. ν_p = coeficiente de Poisson.
- V = diferencia de potencial entre los electrodos de la cerámica.
- ε_{33}^T = permitividad en tensión constante según dirección 33.
- ε_{33}^S = permitividad en deformación constante según dirección 33.
- ε_{33}^p = permitividad constante correspondiente al modo radial según dirección 33.
- s_{11}^E = compliancia elástica sobre un campo eléctrico constante.
- k_p = factor de acoplamiento electromecánico del modo radial.
- k_{33} = factor de acoplamiento electromecánico de modo longitudinal.
- c_{11}^p = componente de la matriz de elasticidad correspondiente al modo radial.

$J = J_0/J_1$, donde J_1 y J_0 son función de Bessel de primera especie y orden uno y cero respectivamente.

II.2.4 Análisis de la cerámica piezoeléctrica seleccionada

Aplicando las ecuaciones (6) y (7) de los modelos analíticos mencionados anteriormente, se obtienen las siguientes gráficas de *admitancia eléctrica* en la figura 25, para la cerámica **PIC255 Ø10 mm y 5 mm de espesor**.

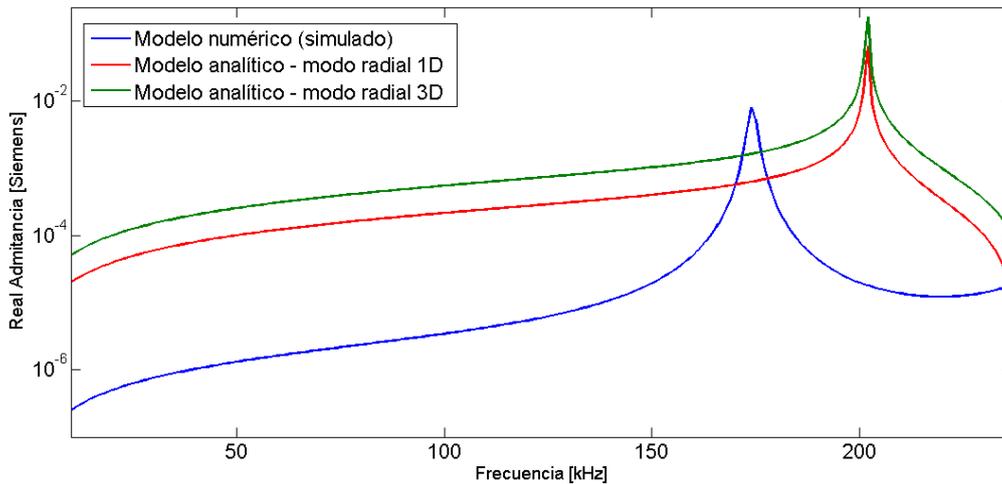


Fig. 25. Gráfica de la admitancia. Analítico vs. Simulado.

Las frecuencias máximas y mínimas que aparecen en la curva de la *admitancia* corresponden a la frecuencia de resonancia (f_r). Se observa que las frecuencias de resonancia obtenidas en los modos radiales con los dos modelos analíticos (1D y 3D) son $f_r = 202$ kHz para ambos. En el modelo numérico simulado en COMSOL, se obtiene una $f_r = 176$ kHz. Esta diferencia, se debe a que en el modelo analítico no se tienen en cuenta las pérdidas ocasionadas por la cerámica.

En cuanto al modelo en modo longitudinal, se obtuvieron una frecuencia de resonancia y antiresonancia de 203 kHz y 342 kHz, que no corresponden con los valores simulados. Esto se debe a que la cerámica no presenta una geometría predominantemente longitudinal (cilindro alargado), por lo que no son aplicables las simplificaciones realizadas para su obtención.

Es interesante poder observar cómo es la dinámica de la vibración en baja frecuencia del primer modo simulado $f_r = 176$ kHz, presentado en la siguiente figura 26.

Las deformaciones en esta cerámica no son tan claras. El primer modo es una combinación del modo radial y la deformación en espesor con un alargamiento en los bordes y una deformación máxima en el eje central (componente radial) al eje longitudinal (componente en espesor) [13].

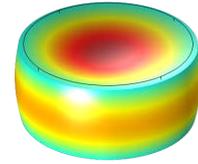


Fig. 26. $F_r=174$ kHz. PIC 255 $\varnothing 10$ mm y 5 mm de espesor.

Como se ha explicado anteriormente, cabe resaltar que el uso de estos sensores acústicos para cámara de burbujas reciben una señal con un ancho de banda de hasta 150 kHz por esto, la señal acústica solo cubre el primer modo para la geometría de esta cerámica.

Estos aspectos afectan a la sensibilidad acústica de los transductores y esta misma presentará ciertas modificaciones al pegarse a las paredes de metacrilato de la cámara de burbujas.

A continuación, se presenta una gráfica de *sensibilidad acústica (RVR)* simulada a través de COMSOL mostrando una aproximación a lo que será la medida experimental de la sensibilidad en el siguiente capítulo.

Se puede ver, cómo la sensibilidad presenta un comportamiento casi que homogéneo en amplitud de ~ 205 dB re V/uPa a partir de la frecuencia de 88 kHz.

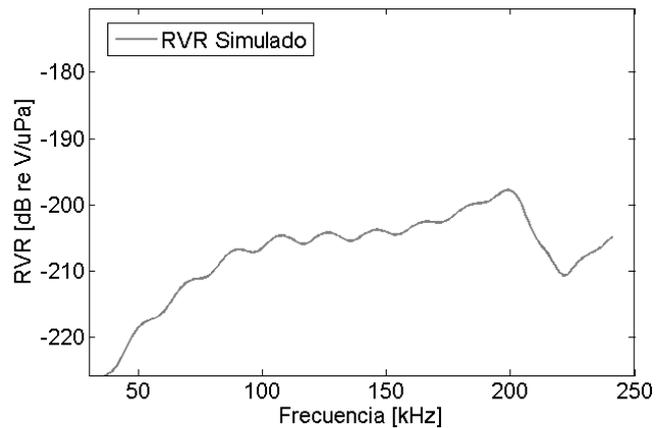


Fig. 27. Curva de sensibilidad acústica (RVR) para la cerámica PIC 255 $\varnothing 10$ mm y 5 mm de espesor.

II.3 Capas de adaptación de impedancia acústica (Matching Layer)

II.3.1 Importancia de las capas de adaptación

La capa de adaptación acústica es usada para incrementar la eficiencia en el acoplamiento de energía acústica del medio incidente (líquido R34a) al medio de transmisión (cerámica). Comúnmente se hace con un material que tiene una impedancia acústica de valor intermedio entre las impedancias del líquido y la cerámica [35]. En otras ocasiones, las condiciones de trabajo o diseño del sensor implican que una de las capas no se pueda modificar, como es en este caso el metacrilato a distintos espesores que conforma la cámara de burbujas donde los sensores irán pegados; sin embargo, este material se ha escogido porque presenta un aumento de la *sensibilidad acústica (RVR)* en ciertas frecuencias, como se verá en la sección **II.3.4**.

En la mayoría de los casos, las cerámicas piezoeléctricas tienen una impedancia mayor respecto a las cargas presentes en ultrasonido de ensayo no destructivo (tejidos, agua, etc) y gran parte de la energía ultrasónica se refleja nuevamente en la interfaz carga/piezoeléctrica. Es por esto que se utilizan las capas de adaptación de impedancia acústica, para lograr mejores resultados en la respuesta del ancho de banda del sensor a diseñar [36].

En estas capas de adaptación, la metodología a emplear es sencilla. Se añade una capa entre la cara receptora de la cerámica piezoeléctrica y la carga acústica, permitiendo así, aumentar la carga mecánica en la interfase.

En la *Tabla 2*, se muestran las impedancias acústicas de los materiales para poder contrastarlas con la capa de adaptación elegida, que en este caso es el metacrilato.

Elemento	c (m/s)	densidad (kg/m ³)	Z (Mrayls)
r134a (1 bar)	737.7	1374	1.0136
r134a (2 bar)	668.3	1328	0.888
r134a (3 bar)	622.3	1295	0.793
Metacrilato	2700	1190	3.21
Cerámica	4000	7800	31.2

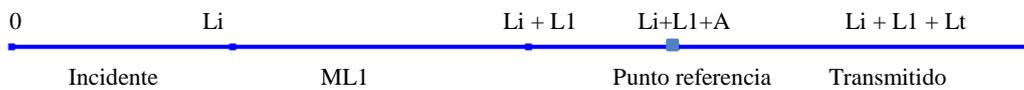
Tabla 2. Valores de la velocidad, densidad e impedancia de los elementos a ensayar.

II.3.2 Modelo numérico

En esta sección, se estudiará el modelo de una capa de adaptación a través de la herramienta de simulación numérica COMSOL Multiphysics.

Preprocesado

- Geometría: se emplea una geometría en 1D para todo el estudio de la transmisión de modo que, para evitar reflexiones, todas las distancias se encuentran parametrizadas. Esta geometría nos permite simular el comportamiento de una onda plana que incide en otro medio y comparar la amplitud resultante cuando se transmite por diferentes capas.



Donde:

- **Li** es el tamaño del tramo incidente en el medio fluido R134a.
 - **L1** es el espesor de la capa de adaptación de metacrilato.
 - **A** es el punto de media.
 - **Lt** es el tamaño (espesor) del tramo transmisor de la cerámica PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor.
- Condiciones de contorno:
 - Dominio de presión acústica: se aplica a todo el dominio.
 - Valores iniciales: estos permiten inicializar desplazamientos o sus derivadas en los dominios. Todos los valores iniciales se fijan en 0. Se aplica a todo el dominio.
 - Presión: se aplica al punto inicial de la geometría (punto de la izquierda).
 - Radiación de onda plana: se aplica al final de la geometría del modelo (punto derecha).



Fig. 28. Gráfica de condiciones de contorno para modelo numérico en 1D de transmisión a una capa.

- Frecuencia de interés y mallado: las frecuencias empleadas para este estudio paramétrico van desde los 10 kHz hasta los 250 kHz en pasos de 100 Hz. Para cada frecuencia, el mallado se discretiza en segmentos de la longitud de onda correspondiente a: $\Delta x = \lambda/16$.

Procesado

La presión p_t es la única variable dependiente. La ecuación de derivadas parciales es la ecuación de ondas en dominio temporal, es decir:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\delta^2 p_t}{\delta t^2} + \nabla \cdot - \frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) = Q_m \quad (9)$$

Donde ρ es la densidad, k es el número de onda. Los valores correspondientes asociados al fluido se han introducido manualmente. Los parámetros q_d y Q_m son fuentes dipolo y monopolo respectivamente. Estas fuentes no están presentes en este trabajo, de modo que la EDP se simplifica.

Postprocesado

El estudio de la transmisión a una capa, se lleva a cabo a través de dos simulaciones. En la primera, se obtiene la presión recibida en un punto A de referencia teniendo todo el modelo el mismo material del medio emisor. En la segunda, el modelo presenta dos zonas, la primera con el medio incidente y la segunda con las propiedades del medio transmisor, de modo que el punto A de referencia se encuentra a la misma distancia del punto emisor, pero ubicado en el medio receptor. En cada uno de los dos casos, el campo acústico se obtiene generando una señal sinusoidal de cinco ciclos con un barrido frecuencial desde los 10 hasta los 250 kHz. Con ello, se registran y comparan las amplitudes de presión obtenidas en el punto A . Así, el cociente entre la presión en el segundo caso (cuando hay medio receptor) y la obtenida en el primer caso (cuando todo es el mismo medio emisor) expresa el coeficiente de transmisión de presión.

II.3.3 Modelo analítico

Modelo de 0 capas

Teniendo en cuenta que se estudia la transmisión de una onda acústica que se genera en un medio y que es recibida por la cerámica donde se registra la señal eléctrica obtenida, se determinan cuáles son las pérdidas propias, cuando la cerámica está dentro del medio a través del estudio de *transmisión de onda acústica a través de una interfase*, como se muestra en la siguiente figura.

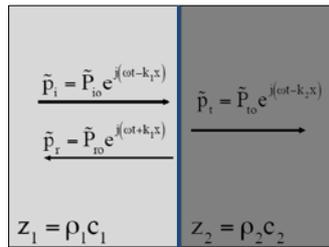


Fig. 29. Esquema de transmisión acústica a través de una interfase.

Donde la presión transmitida es igual a la presión incidente más la presión reflejada, $p_t = p_i + p_r$ y con la velocidad de las partículas del medio $\vec{u}_t = \vec{u}_i + \vec{u}_r$, se deduce el coeficiente de transmisión de intensidad acústica con la siguiente ecuación [15,37].

$$T_i = \frac{4Z_2/Z_1}{(Z_2/Z_1 + 1)^2} \quad (10)$$

Donde Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas características de los medios incidente y transmisor, respectivamente.

Modelo 1 capa

Al necesitar mejorar la impedancia en la que la onda acústica empieza su recorrido desde el medio donde se genera la señal acústica (fluido R134a) hasta el medio donde se recibe dicha señal (cerámica); se realiza un estudio de capas de adaptación con metacrilato de espesores de 5 mm y 10 mm para determinar qué mejoras se obtienen utilizando este material, a través de un caso sencillo que consiste en un sistema formado por dos medios semi-infinitos donde se ubica la capa de material con los espesores L determinados, tal como se ilustra en la siguiente figura 30.

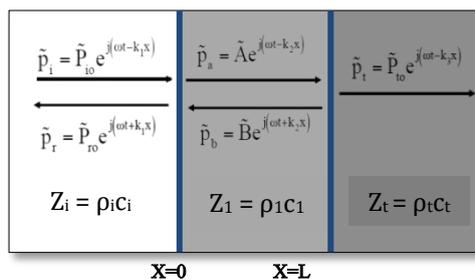


Fig. 30. Esquema de transmisión acústica a través de una capa.

Como se ha descrito anteriormente, para la *figura 22. Esquema de transmisión acústica a través de una interfase*, se obtiene el coeficiente de transmisión de intensidad acústica para una capa [15], empleando la siguiente ecuación para el estudio por el método analítico.

$$T_I = \frac{4}{2 + (Z_t/Z_i + Z_i/Z_t)\cos^2(k_1L) + (Z_1^2/Z_iZ_t + Z_iZ_t/Z_1^2)\sin^2(k_1L)} \quad (11)$$

Partiendo que se conoce la impedancia acústica del medio donde se genera la señal acústica ($Z_{i\ R134a}$) y del medio donde se recibe dicha señal ($Z_{t\ cerámica}$). El comportamiento de esta expresión se observa a través de los parámetros de las distintas capas de adaptación, como son su K_I , Z_I y L .

Para el caso, $Z_i < Z_I < Z_t$ la mejor impedancia que optimiza la transmisión, es aquella que cumple la siguiente expresión:

$$Z_I = \sqrt{Z_i \cdot Z_t} \quad (12)$$

II.3.4 Análisis de las capas de adaptación

A partir del modelo de 0 capas, podemos estimar la pérdida de señal que se espera si tuviésemos únicamente las cerámicas libres en el interior del fluido sobrecalentado. Posteriormente, mediante el modelo de 1 capa se puede analizar la influencia de las capa de metacrilato que conforman las paredes de la caja que contiene el fluido.

Modelo de 0 capas: sensores libres

En este caso, la onda acústica se genera en el fluido sobrecalentado R134a (con impedancia acústica $Z_{i,1\text{bar}} = 1.0133 \text{ MRayls}$, $Z_{i,2\text{bares}} = 0.8875 \text{ MRayls}$, $Z_{i,3\text{bares}} = 0.80588 \text{ MRayls}$ para cada una de las tres presiones) y se recibe por la cerámica (con impedancia acústica $Z_t = 31.2 \text{ MRayls}$), donde se registra la señal eléctrica obtenida. Aplicando la ecuación (10) es decir, cuando no hay capas de adaptación, para determinar las pérdidas propias de de la cerámica cuando esta se encuentra en el agua, se tienen los siguientes *índices de transmisión* T_i :

$$T_{i,1\text{bar}} = 0.12$$

$$T_{i,2\text{bares}} = 0.10$$

$$T_{i,3\text{bares}} = 0.09$$

Se observa que, aproximadamente, un 10% de la señal generada en el medio es la que se transmite finalmente a la cerámica.

Modelo 1 capa: sensores pegados

Entendiendo la importancia del uso de una capa de adaptación para maximizar la transmisión, la optimización de la transmisión acústica entre el medio y la cerámica se debe realizar mediante una capa intermedia que haga progresiva la adaptación de impedancias, cumpliendo con la ecuación (12). Por ejemplo, trabajando a 2 bares, la máxima transmisión se obtendría mediante una capa con impedancia intermedia de $\sqrt{Z_{R134a} \cdot Z_{cerámica}} = \sqrt{(887500) (31.2 \cdot 10^6)} = 5.32 \text{ MRayls}$.

En este caso, se tienen dos capas de metacrilato de diferente espesor (5 y 10 mm), con una impedancia de 3.21 MRayls , es decir, que en principio no podremos alcanzar una transmisión óptima. Aun así, se puede calcular las curvas de transmisión resultantes al pegar los sensores piezoeléctricos a ambas paredes de la caja de metacrilato y predecir las frecuencias donde aumentará su sensibilidad.

A continuación, en la *figura 31*, se presenta una gráfica comparativa tanto simulada como analítica, de las curvas de transmisión de la capa de adaptación empleada correspondiente al metacrilato, con espesores de 5 mm y 10 mm, a las diferentes presiones de trabajo.

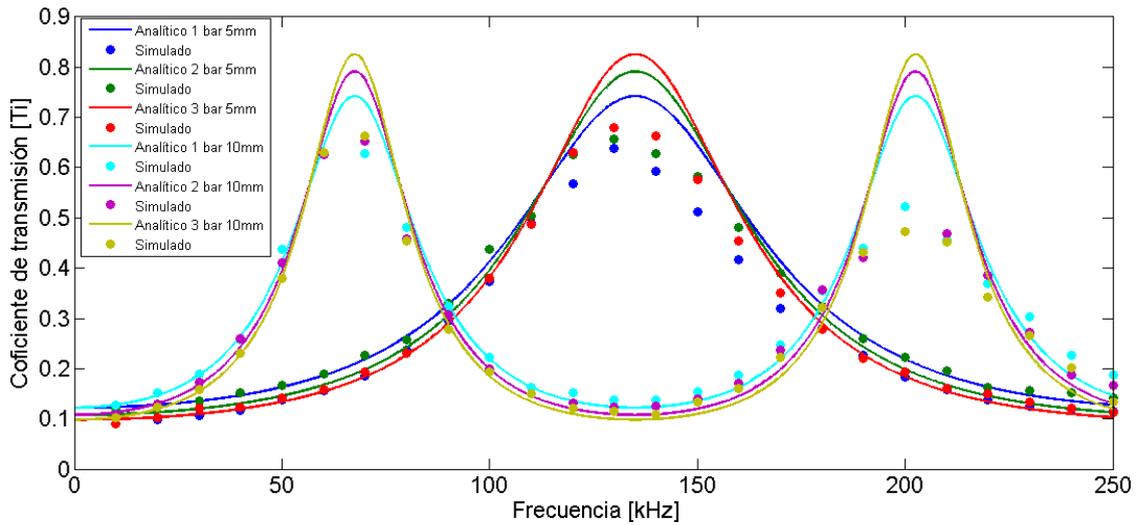


Fig. 31. Comparación del coeficiente de transmisión acústico con 1 capa de metacrilato, analítico vs. numérico (simulado).

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. Los valores de dichas frecuencias y transmisiones máximas, para los dos espesores de metacrilato, aparecen en la siguiente *Tabla 3*. El máximo se produce para la frecuencia tal que su espesor sea igual a $\lambda/4$, es decir, que es independiente del fluido y de la cerámica siempre que el orden de impedancia sea el correcto.

	5mm		10 mm			
	1er máximo Anali. / Simula.		1er máximo Anali. / Simula.		2º máximo Anali. / Simula.	
Presión	Frecuencia [kHz]	Ti	Frecuencia [kHz]	Ti	Frecuencia [kHz]	Ti
1 bar	135.2 / 130.0	0.74 / 0.62	67.4 / 70.0	0.74 / 0.62	202 / 200	0.74 / 0.48
2 bar	135.2 / 130.0	0.79 / 0.77	67.4 / 70.0	0.79 / 0.77	202 / 200	0.79 / 0.51
3 bar	135.2 / 130.0	0.82 / 0.80	67.4 / 70.0	0.82 / 0.80	202 / 200	0.82 / 0.58

Tabla 3. Valores comparativos analítico vs. numérico (simulado) para T_i con metacrilato de 5 y 10 mm de espesor.

Los valores de los coeficientes de transmisión T_i para la curva analítica se mantienen iguales en sus dos máximos; mientras que para la curva simulada se presenta una disminución del T_i en el segundo máximo respecto al primero para cada una de las tres presiones de trabajo. Se puede decir, que el metacrilato como capa de adaptación diseñado con dos espesores de 5 mm 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 T_i entre un 70% u 80% de la energía emitida en el medio y recibida en la cerámica.

II.4 Encapsulado (Housing)

II.4.1 Importancia del encapsulado

En todas las medidas de calibración acústica 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 32*, 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 (la onda electromagnética que genera el emisor llega casi de forma instantánea al receptor). No obstante, para más bajas frecuencias se observa que la onda electromagnética se solapa con la onda acústica, con lo que la amplitud de esta última se necesita conocer para determinar si la sensibilidad del sensor puede verse afectada de modo que la calibración podría ser errónea.

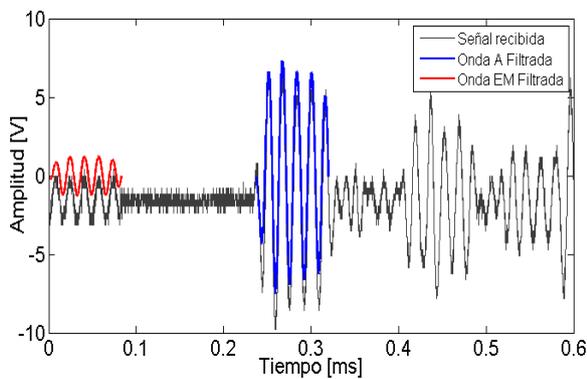


Fig. 32. Señal recibida en proceso de emisión-recepción en cerámicas piezoeléctricas.

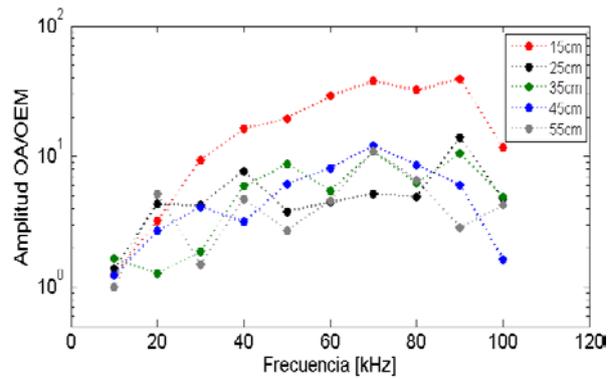


Fig. 33. Capa envolvente provisional en una de las cerámicas.

En estudios previos realizados por el *Grupo de Investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas*, se ha demostrado cómo al envolver la cerámica con una capa conductora de espesor dado (esto es, una cámara de Faraday sin efecto Hall), se reduce la amplitud de la onda electromagnética recibida.

En la *figura 32*, se muestra la capa envolvente provisional en uno de las cerámicas y la diferencia de amplitud de la onda electromagnética con y sin dicha capa. En ella, se observa cómo la amplitud de la onda acústica no se ve prácticamente afectada. Por lo tanto, se puede 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.

II.4.2 Diseño y construcción

El diseño del encapsulado se realiza mediante el software AutoCAD como una aproximación al diseño real. Este diseño consiste en dos partes: una posterior donde irá pegada la cerámica piezoeléctrica y la segunda parte, la frontal encargada de enroscar y proteger el interior del encapsulado de posibles filtraciones. Todo el encapsulado se construirá de aluminio, material con buena conducción a la electricidad, de bajo coste y resistente a altas temperaturas.

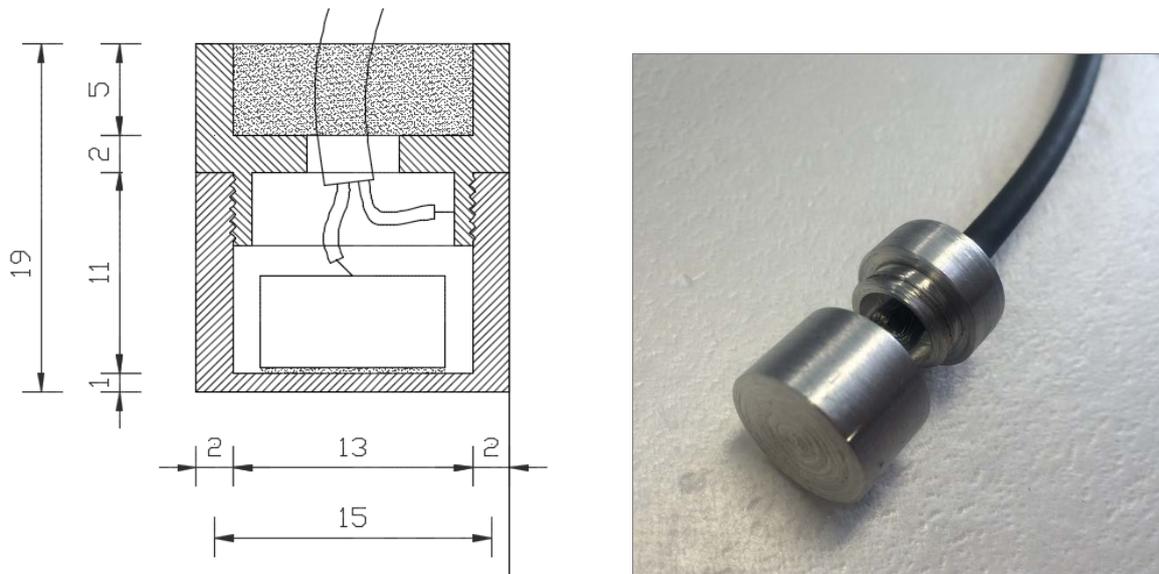


Fig. 34. Diseño del encapsulado (housing), escala 1:100.

Una vez diseñado el encapsulado de aluminio, se procede al montaje del sensor completo, tal como se describe a continuación:

- Se pasa un cable coaxial por el orificio que cierra el transductor y se pega a lo que será el polo positivo al centro de una de las caras de la cerámica con epoxy conductor. Posteriormente se deja secar completamente, aproximadamente 24 horas.



Fig. 35. Cable coaxial pegado al polo positivo de la cerámica con epoxy conductor.

- Completado el paso anterior, se pega la otra cara de la cerámica a la parte frontal el encapsulado con el mismo epoxy conductor, y nuevamente se deja secar 24 horas.

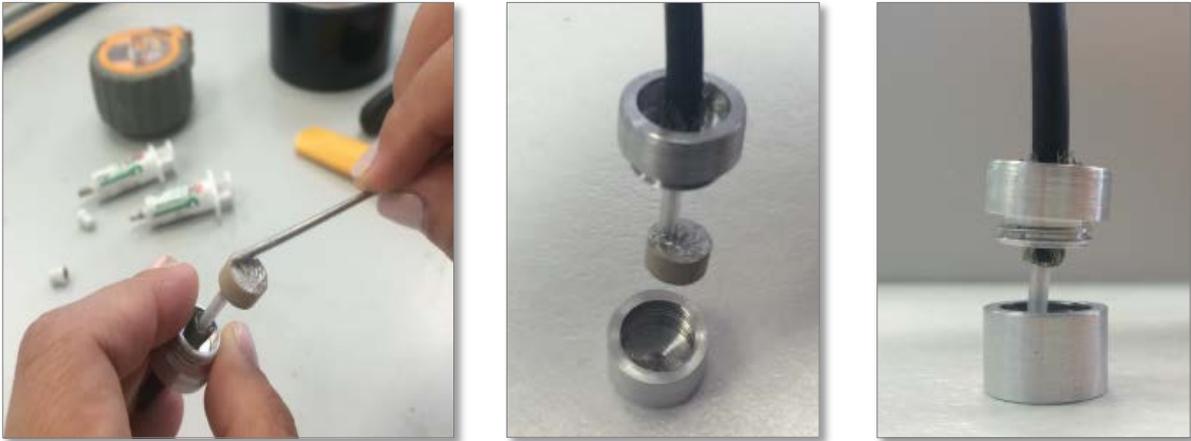


Fig. 36. Pegado de la cerámica al encapsulado con epoxy conductor.

- El polo negativo o el apantallamiento del cable, hará contacto con el mismo encapsulado, y en el extremo del cable, se usará un conector BNC.

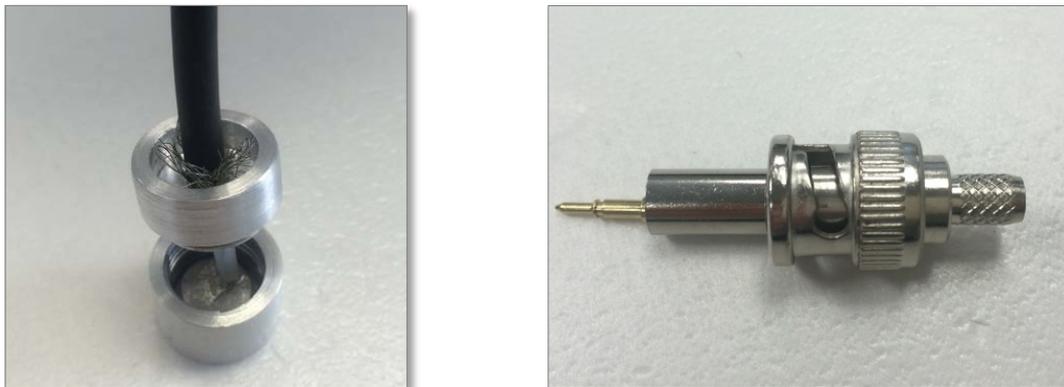


Fig. 37. Apantallamiento del cable haciendo contacto con el encapsulado y conector BNC.

- Se enrosca el sensor y se sellan las uniones exteriores con el pegamento aislante *Weicon Lock Pen Sistem AN 302-43* para evitar filtraciones. El orificio que cierra el sensor, se sella con *Sikaflex*, que es un material adhesivo a base de poliuretano de elasticidad permanente, y posee una gran resistencia al agua.

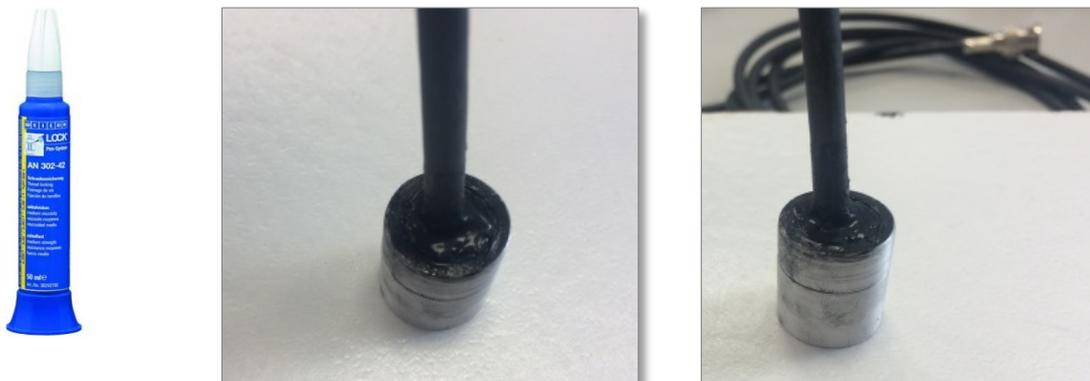


Fig. 38. Sensor sellado con Sikaflex.

- Por último se pegan los dos sensores a la cámara de burbujas con material epoxy conductor, y se dejan secar durante 24 horas.

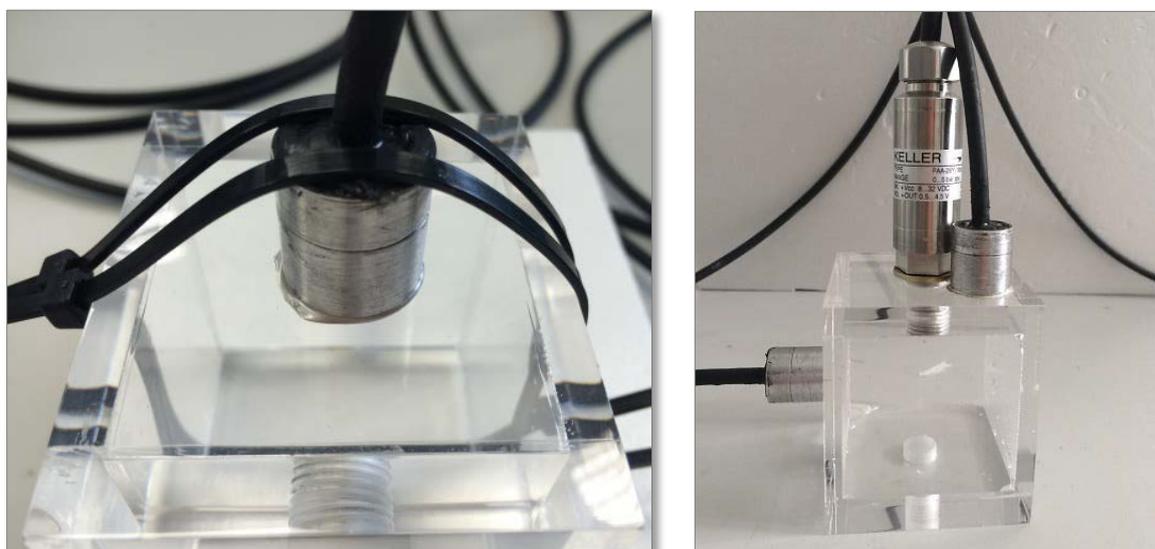


Fig. 39. Proceso de secado de los sensores a la cámara de burbuja.

III. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

La *admitancia eléctrica* y la *sensibilidad acústica (RVR)* son características fundamentales que definen a los sensores piezoeléctricos [38] por este motivo se describirán en este capítulo los procesos para la caracterización de dichos sensores y posteriormente se explicarán los montajes experimentales de tales magnitudes que consisten en medidas con cerámica y sensores libres en agua para posteriormente realizar medidas de chispas y calibración con hidrófono emisor dentro de la cámara.

III.1 Magnitudes del sensor a caracterizar

III.1.1 Admitancia eléctrica

Para realizar la medida de la admitancia, se hace uso del medidor de impedancias de alta frecuencia Wayne Kerr Electronics WK6500P, que posee una precisión de $\pm 0.5\%$. Este medidor envía señales de distintas frecuencias según el barrido frecuencial que se desee con una tensión de amplitud homogénea en voltios a la cerámica. Este analizador permite obtener de manera fiable un valor para la frecuencia de resonancia y antiresonancia tanto para la cerámica como para los sensores. A continuación, se muestra el montaje y conexionado de los distintos equipos utilizados para la medida de la admitancia en el tanque.

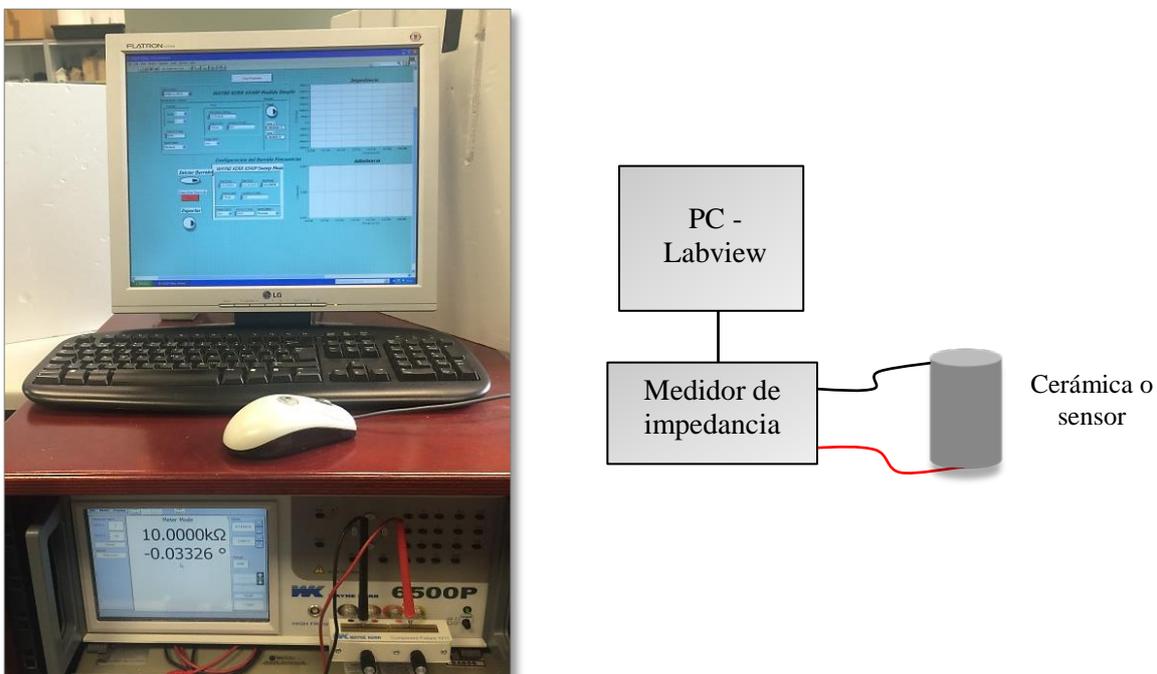


Fig. 40. Imagen y esquema de montaje y conexionado para medida de admitancia.

Procedimiento

1. La instrumentación utilizada se conecta a los cables soldados a la cerámica libre en agua en cada una de sus caras o en su defecto al sensor libre o pegado a la cámara de burbujas a través de un cable BNC.
2. Para las medidas realizadas, se emite una señal sinusoidal con un barrido frecuencial desde los 10 kHz hasta los 250 kHz en pasos de 0.1 kHz y una tensión de amplitud de 500 mV, estos valores son seleccionados por medio de un software de Labview existente. A través de la diferencia de potenciales, se mide la respuesta que devuelve el transductor y se realizan de 1 a 3 medidas de la admitancia de las dos cerámicas y sensores.
3. Por último, se guardan los datos registrados en un archivo tipo texto *.txt* para ser procesados.

III.1.2 Sensibilidad acústica (RVR)

Es un parámetro importante que caracteriza un transductor para emitir o recibir una señal a una frecuencia determinada, esto quiere decir que aplicando el mismo nivel sonoro a una señal, el transductor presentará una mayor sensibilidad en aquellas frecuencias donde su amplitud sea mayor. La respuesta de transmisión de un transductor bajo el agua es la relación de la respuesta a la tensión aplicada. La sensibilidad de cada sensor en las distintas configuraciones se determina a través del *Received Voltage Response* (RVR), que se define como:

$$RVR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{rms}}{P_{ref}} \right) \left[dB \text{ re } \frac{1V}{\mu Pa} \right] \quad (13)$$

Donde P_{ref} es el valor eficaz de la presión sonora de la onda acústica que incide sobre la superficie del transductor y V_{rms} es el voltaje *rms* registrado en bornes del transductor cuando incide dicha señal [39].

Para realizar la medida de la *sensibilidad acústica (RVR)* se emplea el generador de funciones *PXI 1031-DC* de *National Instruments* de dos canales que conectado al PC envía señales por uno de sus canales y recibe por el otro canal. También es necesario el uso de un amplificador de potencia 2100L RF de E&I. para aumentar el nivel sonoro del transductor ya que es inferior al de las frecuencias que interactúan y a este se conecta una *sonda* para atenuar la señal 100 veces y poder registrarla con el *PXI*. Por último, se emplea un transductor electro-mecánico, el *FFR SX60* para convertir las señales eléctricas generadas por el generador de funciones y amplificadas posteriormente en señales acústicas que irá dentro de un tanque de dimensiones 120x80x60 cm³.

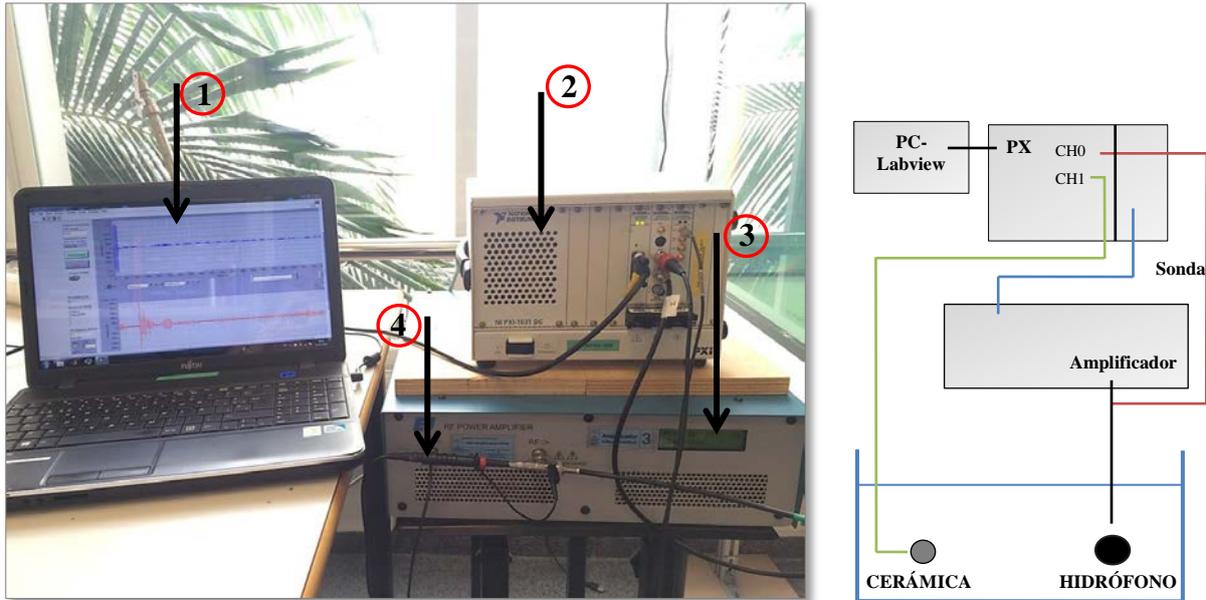


Fig. 41. Imagen y esquema del montaje experimental y conexionado para medida de sensibilidad (RVR). 1- PC con programa en LabVIEW para automatizar el proceso de emisión/grabación. 2- Generador de funciones. 3- Amplificador de potencia 2100L RF de E&I. 4- Sonda.

Procedimiento

1. Se emite una señal sinusoidal con una frecuencia inicial de 10 kHz hasta 250 kHz en pasos de 1 kHz. La amplitud en voltios pico a pico es de 600mVpp y una frecuencia de muestreo de 2 MHz.
2. Como parámetros del hardware PXI de Nationals Instruments, se tiene que en el canal 0 se conecta el emisor que en su defecto será el hidrófono FFR SX60. En el canal 1, se conecta la cerámica o el sensor en modo libre.
3. La distancia entre el emisor (hidrófono FFR SX60) y receptor (cerámica o sensor piezoeléctrico), será del orden de los 23 cm.
4. Se crea una carpeta y se especifica la ruta para almacenar los datos obtenidos.
5. Se realizan 5 muestras para cada frecuencia. Registrando la tensión eléctrica, se obtiene la respuesta que devuelve el sensor.
6. Por último, se procede a realizar un análisis de las señales registradas mediante el software Matlab.

III.2 Montajes experimentales

Para las medidas experimentales y la toma de los datos, existen factores propios que afectan el proceso de calibración [40], tales como son:

- Las ondas electromagnéticas: estas son las primeras en aparecer ya que hacen parte del instrumental de medida utilizado y viajan mucho más rápido que el sonido en el medio, por lo tanto se debe tener en cuenta la distancia entre el emisor y el receptor ya que para algunas frecuencias la onda electromagnética solapará con la primera recepción acústica [36].
- Reflexiones: se deben a las paredes del tanque, viéndose afectada la señal recibida cuando las reflexiones llegan primero que la señal directa que se recibe, es por esto que para diferenciar ambas señales se debe ubicar el emisor (hidrófono FFR –SX60) y el receptor (sensor) lo más alejados de las paredes, la superficie y el fondo del tanque.
- Distancia entre emisor y receptor: se tiene en cuenta, que esta distancia debe ser lo más parecida posible a todas las que se realicen y se calcula a través del método de detección por correlación cruzada entre la señal enviada y la señal recibida [40].

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se realizan tres configuraciones de medidas: cerámicas y sensores libres en tanque, sensores pegados a la cámara de burbujas: calibración con chispas, sensores pegados a la cámara de burbujas: calibración con hidrófono emisor.

III.2.1 Medidas de cerámicas y sensores libres

En la siguiente *figura 42*, se presentan los montajes realizados para cada medida.

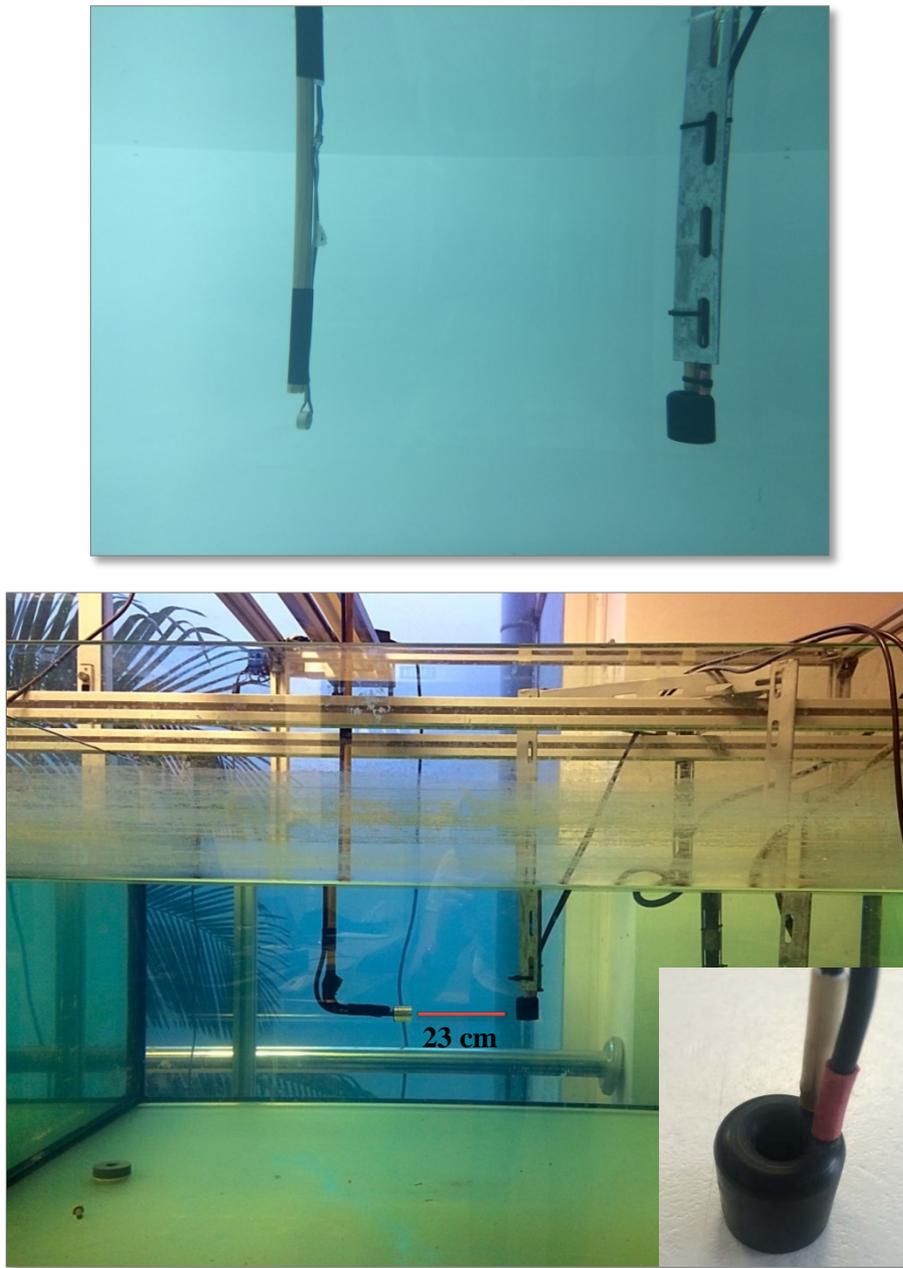


Fig. 42. Fotos de los montajes experimentales para medida de admitancia y sensibilidad (RVR) con cerámicas y sensores en tanque con hidrófono FFR SX60.

Como se comentó anteriormente, empleando el Hidrófono FFR SX60 a una distancia de la cerámica ó el sensor libre de aproximadamente 23 cm, se realiza el proceso de la obtención de la *admitancia eléctrica* y la *sensibilidad acústica (RVR)*, efectuadas en el tanque que tiene unas medidas de 120x80x60 cm³. Para la medida de la *sensibilidad acústica (RVR)* se realizan cinco muestras para cada frecuencia y se emite una señal de cinco ciclos.

III.2.2 Medidas de sensores pegados: calibración con chispas

Para este montaje experimental, se mide nuevamente la *admitancia eléctrica* con los sensores pegados a la cámara de burbujas, como se observa en las fotografías de la *figura 43*. El proceso sigue siendo el mismo descrito en la *sección III.1.1*.

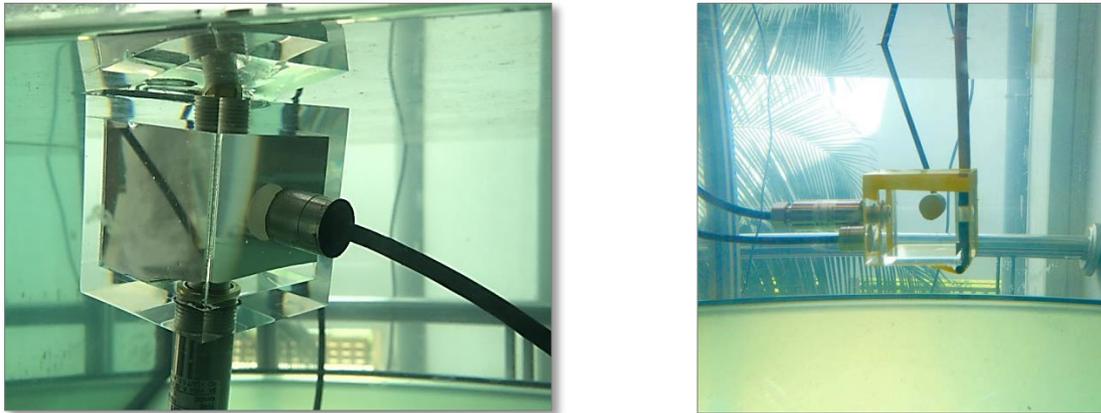


Fig. 43. Medidas experimentales de la admitancia, con sensores pegados a la cámara de burbujas.

En la siguiente *figura 44*, se presenta una fotografía y un esquema del conexionado del procedimiento para la generación de una chispa eléctrica que se lleva a cabo a partir de la descarga de un condensador de 22 mF al cortocircuitar sus bornes eléctricos dentro de la cámara de burbujas. Para la carga del condensador, se utiliza una fuente de corriente continua Thurlby Thandar PL320. El condensador se carga a una tensión de 30V y el experimento se realiza dejando fijo el polo negativo del condensador y haciendo contacto con el polo positivo para generar la descarga.

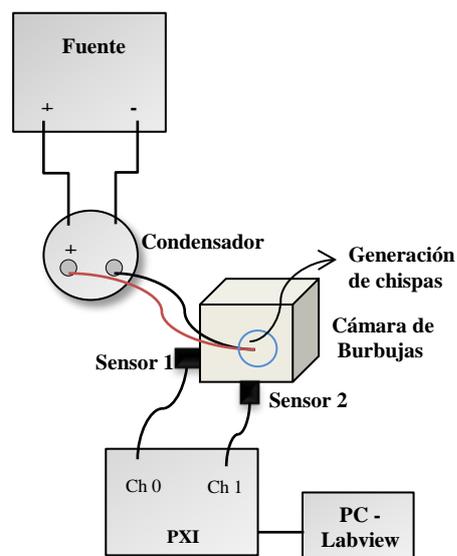
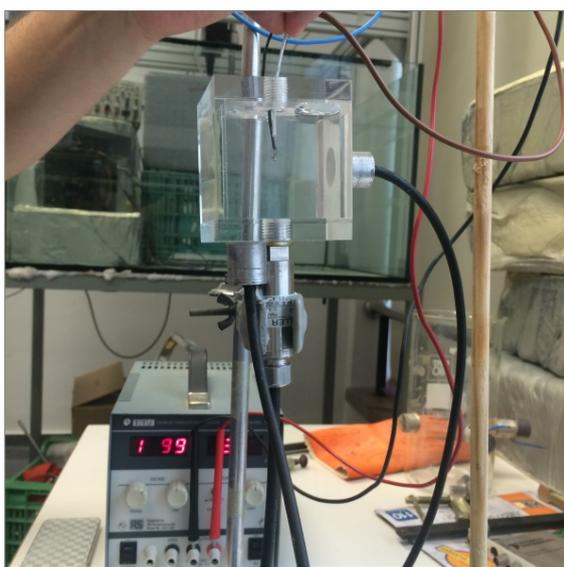


Fig. 44. Imagen y esquema del montaje y conexionado de los sensores pegados: calibración con chispas.

El valor de la corriente para todas las medidas es de 300 mA. Los sensores 1 y 2 se conectan al canal 0 y canal 1 respectivamente, tal como se presentó en la anterior *figura 44*. Los dos canales graban la señal acústica producida por la chispa a una frecuencia de muestreo de 2 MHz que también han sido capturadas previamente por cada uno de los sensores que se encuentran pegados a la cámara de burbujas.

La siguiente *figura 45*, muestra un ejemplo de la generación de la chispa en el tanque.



Fig. 45. Ejemplo de generación de chispa dentro del tanque.

Se realizan 5 medidas para escoger la más adecuada y presentar el análisis de la señal. Se tiene en cuenta que al momento de realizar el cortocircuito entre los bornes del condensador este debe entregar toda la energía almacenada con el primer contacto y la tensión debe tener un valor similar en casi todas las medidas. Luego, se carga el condensador y los bornes del mismo son sumergidos dentro de la cámara de burbujas llena de agua y se inicia la descarga haciendo contacto con el polo negativo y el polo positivo del condensador como se comentó anteriormente.

III.2.3 Medidas de sensores pegados: calibración con hidrófono emisor

En este montaje experimental, se emplea el hidrófono emisor RESON TC4013 con un diámetro de 9.5 mm, que se incorpora dentro de la cámara de burbujas con agua en su interior. El montaje experimental sigue como se muestra en la siguiente *figura 46*.

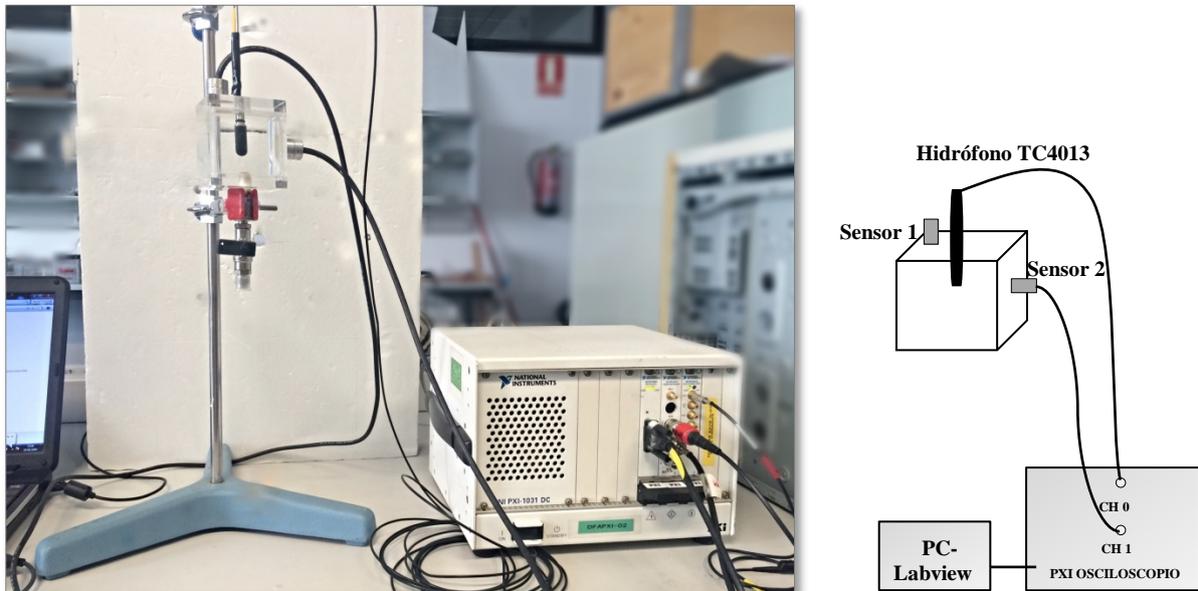


Figura 46. Imagen y esquema del montaje y conexionado de los sensores pegados: calibración con transductor emisor.

Se emite una señal sinusoidal de 5 ciclos, con un barrido frecuencial desde los 10 kHz hasta los 250 kHz en pasos de 1000 kHz, con un voltaje de 12 Vpp y una frecuencia de muestreo de 2 MHz. El *sensor 1* se conecta en el canal 1 del PXI, y recibe la señal acústica generada por el hidrófono TC4013 conectado al canal 0. Esta prueba se realiza seis veces, para luego hacer el cambio con el *sensor 2* de la misma manera. La distancia entre el hidrófono RESON TC4013 y los sensores es de 3 cm, teniendo en cuenta que las medidas internas de la cámara de metacrilato son de 5 cm en todos sus lados. Posteriormente se analizan los datos obtenidos y se obtiene la curva de *sensibilidad (RVR)* para cada sensor, y se comparan los resultados con los modelos analítico y numérico (simulado) presentados en la *sección II.3.4*.

IV. RESULTADOS

A lo largo de esta tesina, se estudió la *Simulación y Diseño de un Sensor Acústico Piezoeléctrico para Detección de Partículas* a través de diferentes capítulos, que van desde las partes del diseño de un sensor, incluyendo el medio de recepción que en su defecto es el fluido sobrecalentado R134a presente dentro de la cámara de burbujas. También se realizó un estudio de modos propios con la herramienta COMSOL Multiphysics donde se emplean presiones de trabajo a 1, 2 y 3 bares y teniendo en cuenta tres casos a desarrollar como son: cámara emisora sin burbujas, cámara emisora con burbujas, cámara completa con y sin paredes de metacrilato en ausencia de burbujas. Esto con el fin de determinar el comportamiento acústico presente dentro de la cámara donde sucede todo el proceso acústico, es decir la generación, crecimiento y emisión de burbujas.

Partiendo de estudios previos realizados por el *Grupo de Investigación en Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas*, se escogió la cerámica piezoeléctrica **PIC255 Ø10 mm y 5 mm de espesor**. Posteriormente, se estudió la capa de adaptación de impedancia acústica (matching layer) que en este caso es el metacrilato de 5 y 10 mm de espesor que conforman la cámara de burbujas y se observan las ventajas del mismo y cómo mejora la transmisión al utilizarlo. También se exponen estudios de las características fundamentales que definen a los sensores piezoeléctricos como son la *admitancia eléctrica* y la *sensibilidad acústica (RVR)*. Todos estos estudios se realizaron a través de dos modelos; uno analítico y otro numérico (simulado) para poder contrastar los resultados entre ellos. Terminando esta primera parte, se presenta una explicación de la importancia del encapsulado (housing) y el diseño paso a paso del montaje de los dos sensores a construir.

Se desarrollaron tres montajes para las medidas experimentales; el primero con las medidas de cerámicas y sensores libres, el segundo con las medidas de sensores pegados: calibración con chispas y el tercero, sensores pegados: calibración con hidrófono emisor.

Se presentan a continuación todas las medidas experimentales de dichos montajes explicados en el anterior *Capítulo III* y contrastados con los modelos estudiados en el *Capítulo II*.

IV.1 Resultados de las distintas configuraciones

IV.1.1 Cerámicas y sensores libres

Cerámicas libres

Partiendo de la existencia de varias cerámicas **PIC 255 Ø10 mm y 5 mm de espesor** empleadas anteriormente para otras pruebas, se realizan medidas de la **admitancia eléctrica** y **sensibilidad acústica (RVR)** con las cerámicas libres en tanque. Se determinará cuáles presentan una mejor respuesta a estas características y así seleccionar dos de ellas para el montaje de los sensores.



Fig.47. Tres de las cinco cerámicas para medida de admitancia eléctrica y sensibilidad acústica (RVR).

A continuación, se presenta en la siguiente *figura 48*, la medida de la **admitancia eléctrica** de las cinco cerámicas.

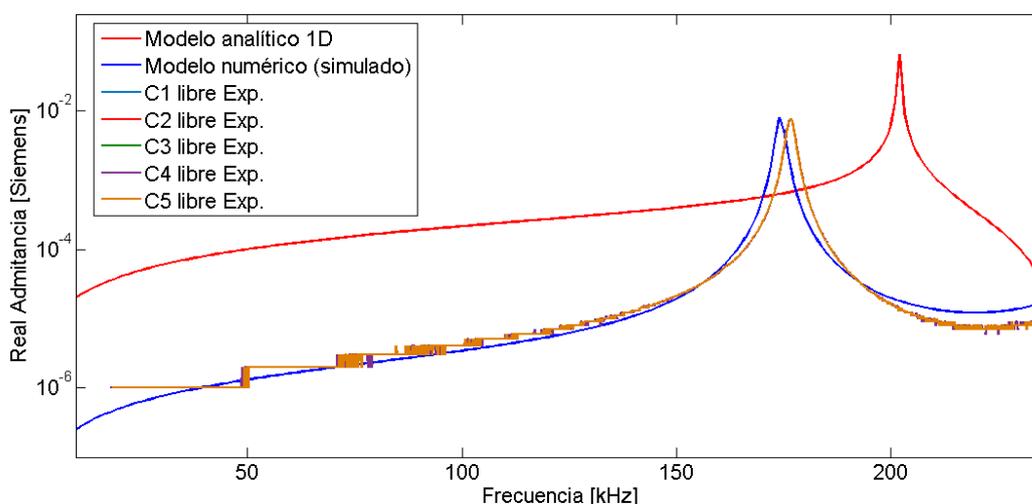


Fig. 48. Gráfica medida de admitancia experimental para cinco cerámicas PIC 255 Ø10 mm y h5 mm libres en tanque vs. modelo analítico y numérico (simulado).

Como se puede observar, para todas las cerámicas la medida experimental de la **admitancia eléctrica** se mantiene idéntica entre ellas, siendo la frecuencia de resonancia $f_r = 176$ kHz, que corresponde a las bajas frecuencias del Modo Radial. Comparando estas medias con las obtenidas en la *sección II.2.4*, se observa que el modelo numérico simulado con la cerámica libre coincide bastante bien con la obtenida experimentalmente ($f_r = 174$ kHz y 176 kHz para el modelo simulado y la medida experimental respectivamente). En este máximo de admitancia se potenciará el ancho de banda del sensor. Se tiene en cuenta que la frecuencia de resonancia de esta cerámica depende tanto de su diámetro como de su

espesor; sin embargo, resaltando lo comentado en la *sección II.2.4*, la frecuencia de resonancia en modo espesor excede el rango frecuencial al cual se desea trabajar. Es por esto que no es necesario una representación gráfica; además, como la geometría no es totalmente cilíndrica (cerámica alargada), la fórmula (8) del modo longitudinal en 1D por Stewart Sherrit no es aplicable para este tipo de geometría.

La siguiente *figura 49*, muestra un ejemplo de *señal acústica recibida* por una de las cerámicas. En ella se puede observar la presencia de señal electromagnética que en algunos casos puede superar o falsear la medida de amplitud de la señal acústica.

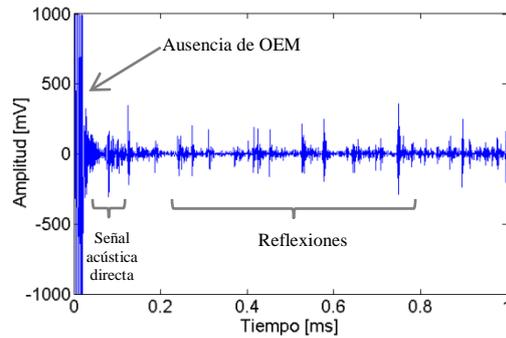


Fig. 49. Ejemplo de señal acústica recibida por una de las cerámicas.

En la siguiente *figura 50*, se presenta *la sensibilidad acústica (RVR)* para las cinco cerámicas en cuestión comparada con la simulada por el modelo numérico.

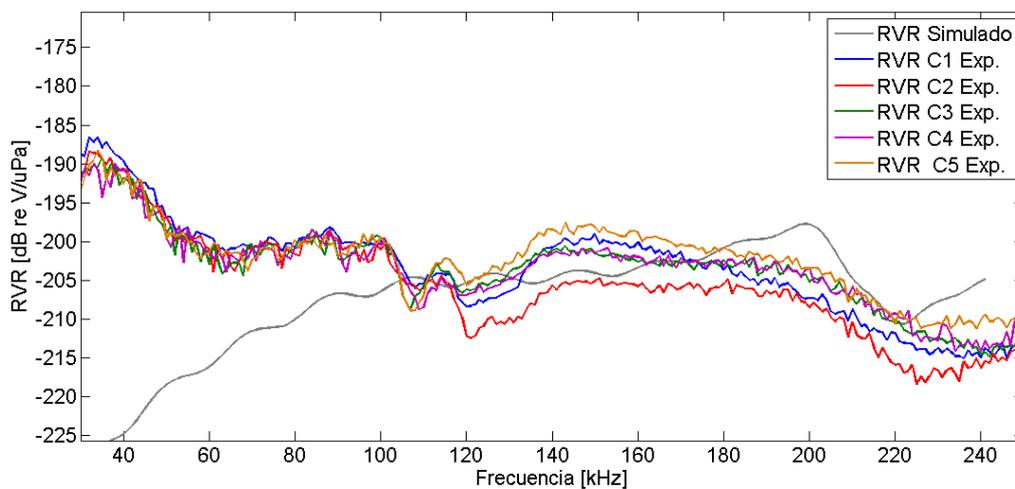


Fig. 50. Gráfica de la sensibilidad (RVR) para cinco cerámicas PIC 255 Ø10 mm y h5 mm libres en tanque vs. modelo numérico (simulado).

Existe una pequeña variación para la gráfica de la *sensibilidad acústica (RVR)* en las cinco cerámicas. Se opta por seleccionar las cerámicas C4 y C5 para la construcción de los sensores acústicos, donde se mantiene más o menos estable los valores de dicha sensibilidad, desde los -195 dB hasta los -203 dB entre los 50 kHz hasta 250 kHz. Desde 0 hasta los ~70 kHz existe un aumento de la sensibilidad debido a la influencia de las ondas electromagnéticas. El modelo numérico (simulado) de la curva de la *sensibilidad acústica (RVR)*, se acerca a la medida experimental a partir de los ~105 kHz.

Sensores libres

Seleccionadas las cerámicas para la construcción de los sensores, se presenta a continuación las medidas tanto de **admitancia eléctrica** como de **sensibilidad acústica (RVR)** para los sensores libres medidos en el tanque y se comparan con las cerámicas libres también medidas en tanque. Esto con el fin de poder observar las posibles mejoras que ofrece el encapsulado.

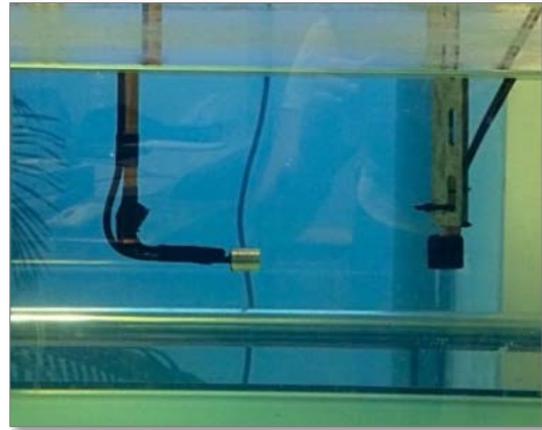


Fig. 51. Calibración, medida de sensor libre en tanque.

En la siguiente *figura 52*, se expone la curva de la **admitancia eléctrica** de las cerámicas contra los sensores.

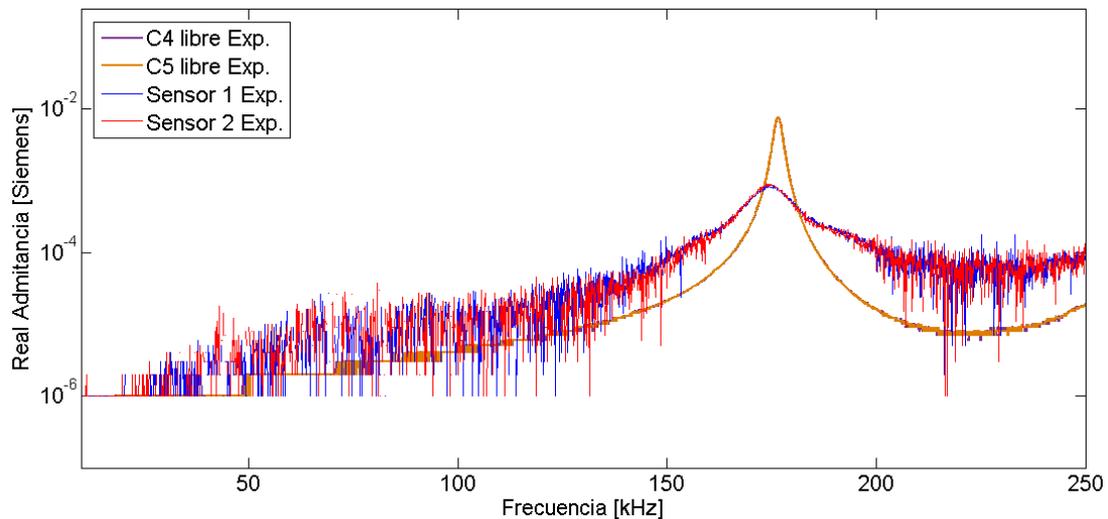


Fig. 52. Comparación medida de admitancia eléctrica de los sensores vs. cerámicas libres en el tanque.

Comparando la curva de **admitancia eléctrica** de las cerámicas y los sensores libres, se tiene una $f_r=174$ y 176 kHz respectivamente, (como se había comentado anteriormente). Esta leve disminución hacia bajas frecuencias de los picos de la curva de **admitancia eléctrica** 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.

La siguiente figura 53 muestra un ejemplo de *señal acústica recibida* para el *sensor 1*. En ella se puede observar que no existe la presencia de onda electromagnética al principio gracias al encapsulado y no hay efecto de reflexiones a partir de la frecuencia dada.

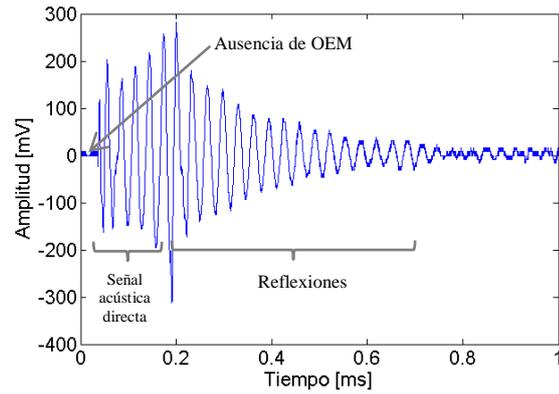


Fig. 53. Ejemplo de señal acústica recibida por uno de los sensores.

A continuación, se presenta en la siguiente figura 54 la curva de *sensibilidad acústica (RVR)* de los dos sensores comparados con las curvas de las cerámicas libres en el tanque.

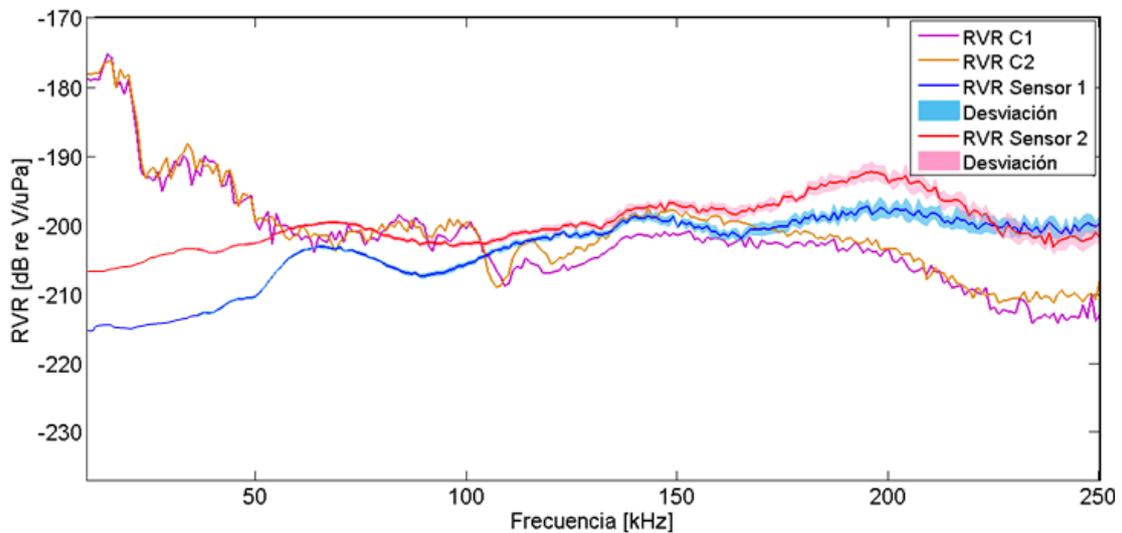


Fig. 54. Comparación de la medida de sensibilidad acústica (RVR) de los sensores vs. cerámicas libres en tanque.

En esta curva, la sensibilidad 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*.

Respecto al estudio de modos que se realizó en el *Capítulo II*, dividido en tres casos: Cámara emisora sin burbuja, cámara emisora con burbuja y cámara completa. Se puede inferir que la presencia o ausencia de burbujas estudiadas incluyendo su tamaño y su posición, no afecta al comportamiento de los modos dentro de la cámara de burbujas; por lo tanto, se observa en el análisis para el caso 3: cámara completa con y sin paredes de metacrilato en condiciones de oscilación libre, que el

metacrilato brinda un aumento hacia las bajas frecuencias y un aumento de la presión acústica, favoreciendo así que la señal acústica generada dentro de la cámara de burbujas y capturada por los sensores, presente un comportamiento de la curva de *sensibilidad acústica (RVR)* estable en todo el rango de bajas frecuencias estudiado, y útil para la detección de partículas tal como se observó en la anterior *figura 54*.

IV.1.2 Sensores pegados: medidas con chispas

Se presentan las señales acústicas que reciben los dos sensores y se realizan cinco medidas de chispas para la calibración de los mismos a través de este método, para mostrar una correlación entre los diferentes voltajes y así testear dicha calibración.

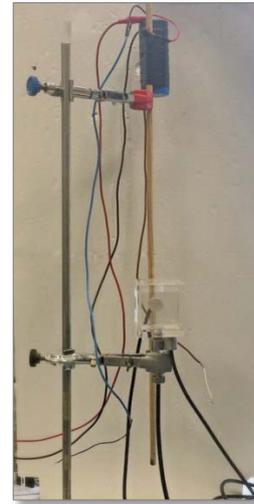


Fig. 55. Sensores pegados: medidas con chispas

A continuación se representa en la figura 56, la curva de **admitancia eléctrica** de los sensores pegados a la cámara de burbujas.

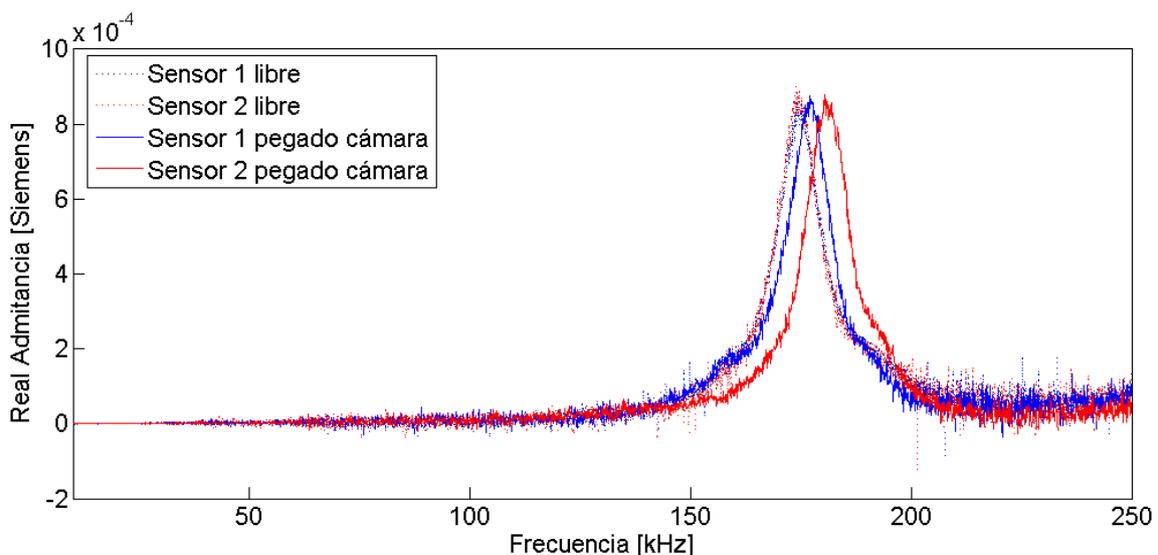


Fig. 56. Gráfica de la medida de la admitancia eléctrica con los sensores pegados a la cámara de burbujas vs. sensores libres.

Se observa que para el *sensor 1* (pegado en el metacrilato con espesor de 10 mm) y el *sensor 2* (pegado en el metacrilato con espesor de 5 mm) pegados en la cámara de burbujas, existe un leve desplazamiento hacia las altas frecuencias en el pico de admitancia, $f_r=177$ kHz y 182 kHz respectivamente, comparada con los sensores libres. Este aumento en la frecuencia de resonancia es debido a la influencia que el metacrilato (cámara de burbujas) ejerce como capa de adaptación (Matching layer) de los sensores permitiendo una mejora de la adaptación de la impedancia de los

medios, ya que la cerámica puede vibrar más libremente. El valor de la frecuencia de resonancia del *sensor 2* es un poco mayor que el *sensor 1*.

A continuación se presentan en la siguiente *figura 57*, las señales acústicas capturadas por los dos sensores en estudio.

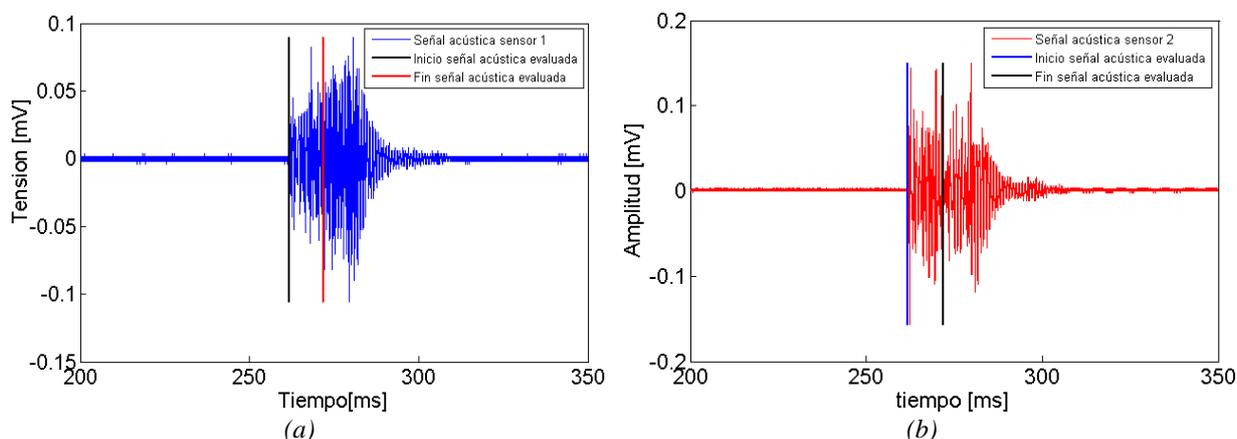


Fig. 57. Señales acústicas capturadas con inicio y final de la señal evaluada durante 10 ms. (a) sensor 1. (b) sensor 2.

En esta *figura 57*, se observan cada una de las señales acústicas registradas por los sensores, para los 30 voltios de carga del condensador.

Seguidamente se presenta la *Tabla 4*, con los valores de tensión máxima y rms, para cada sensor.

	CANAL 0 - SENSOR 1		CANAL 1 - SENSOR 2	
	Vmax	Vrms	Vmax	Vrms
Chispa 1	0.0820	0.0229	0.1563	0.0526
Chispa 2	0.1016	0.0221	0.2266	0.0547
Chispa 3	0.0938	0.0188	0.1563	0.0425
Chispa 4	0.2500	0.0249	0.1680	0.0265
Chispa 5	0.0977	0.0211	0.1660	0.0500

Tabla 4. Tabla con valores de voltaje máximo y voltaje RMS para cada sensor.

Realizadas cinco medidas de chispas para la calibración de los sensores a través de este método, con ello se observa en la *Tabla 4*, una correlación entre los diferentes voltajes para testear dicha calibración.

IV.1.3 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 en la *sección II.3.4.* (modelos analítico y numérico *figura 31*).

Se realizan un total de 6 medidas para cada sensor, luego se analizan y posteriormente se selecciona una de cada sensor para presentar el estudio en cuestión.



Fig. 58. Sensores pegados: medida con hidrófono RESON TC4013.

La siguiente *figura 59*, muestra un ejemplo de *señal acústica recibida* por el *sensor 1* pegado en la cámara de burbujas. Aunque la onda electromagnética es mínima, se aprecian reflexiones considerables, debido a la corta distancia de 3 cm que hay entre el hidrófono RESON TC4013 y el sensor. Por lo que la señal recibida se verá modificada si las reflexiones llegan antes de que termine la recepción de la señal directa.

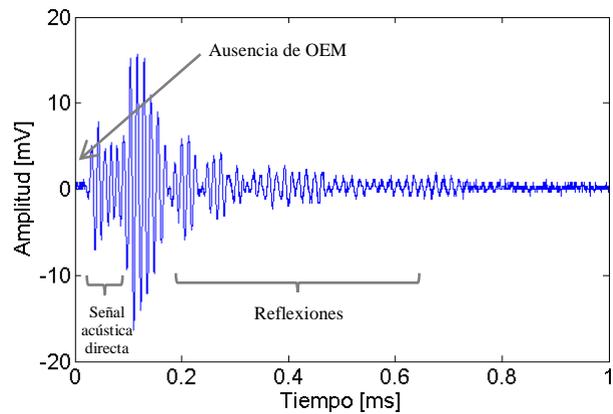


Fig. 59. Señal acústica recibida por uno de los sensores.

Seguidamente, se presenta en la siguiente *figura 60*, la curva de la *sensibilidad acústica (RVR)* obtenida para cada sensor pegado en la cámara de metacrilato, aun cuando no se mide en las condiciones óptimas de calibración.

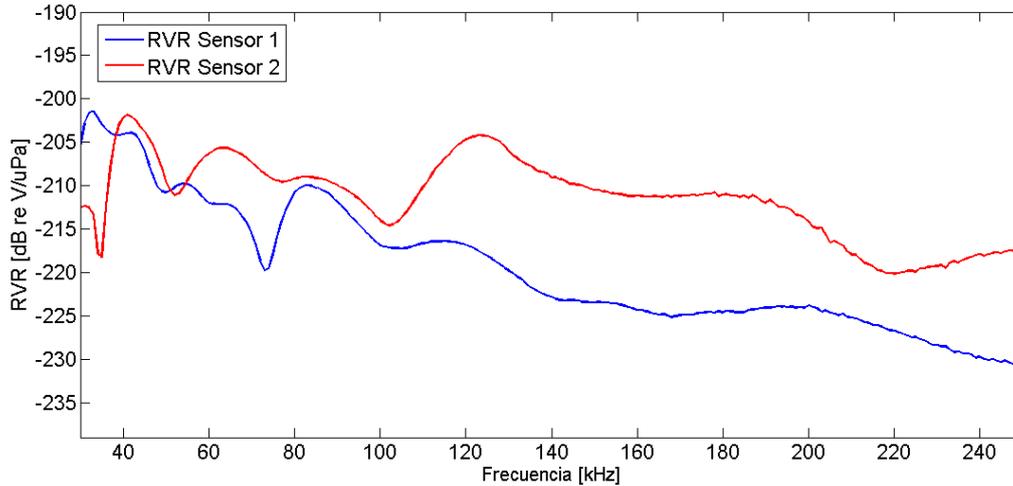


Figura 60. Gráfica de sensibilidad acústica (RVR) para sensores pegados: calibración con transductor emisor en cámara de burbujas.

En esta gráfica se observa claramente cómo en el *sensor 1* pegado en la pared de la cámara de burbujas de 10 mm, existe un aumento en la frecuencia de 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 la frecuencia de 124 kHz, próxima al modelo numérico de 135 kHz.

Se puede inferir que los valores de transmisión máxima (T_i) presentados en la *sección II.3.4* se acercan a los valores experimentales obtenidos en este montaje, por lo que los sensores presentarán un buen desempeño para estas frecuencias en el momento de recibir las señales acústicas una vez el detector de partículas MODA-LS entre en funcionamiento.

Aunque en este último análisis se presenta la curva de la *sensibilidad acústica (RVR)*, se hace la aclaración de que al estar el hidrófono emisor RESON TC4013 dentro de un espacio tan pequeño como lo es la cámara de burbujas y los sensores pegados en ella, se tiene en cuenta que existirán múltiples reflexiones antes de terminar la emisión de gran parte de las frecuencias analizadas. Por lo tanto, estos últimos resultados no pertenecen propiamente a una calibración de sensibilidad acústica como tal, pero sí permite expresar un contraste entre las frecuencias máximas medidas con las esperadas analítica y numéricamente en la *sección II.3.4*.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Estudiado y entendido todas aquellas partes que conforman un sensor acústico para detección de partículas y caracterizarlo a través de magnitudes tales como la admitancia eléctrica y sensibilidad (RVR), a través de modelos analíticos, numéricos y experimentales, se puede concluir lo siguiente:

Para el medio de recepción: interior de la cámara de burbujas

- La distribución de los modos para las tres presiones de trabajo del detector (1, 2 y 3 bares) en el resultado analítico y numérico (simulado) poseen una desviación mínima entre ellas.
- Conforme aumenta la presión, las frecuencias de los modos resultantes decrecen. Se confirma que la cámara emisora es más sensible para bajas frecuencias (mayor contenido de estas) cuanto mayor sea la presión de funcionamiento del sistema.
- En el estudio de modos realizado en el interior de la cámara de burbujas, divididos en 3 casos como son: *cámara emisora sin burbuja*, *cámara emisora con burbuja* y *cámara completa teniendo en cuenta el espesor del metacrilato*; se puede concluir para los dos primeros casos que la influencia de burbuja para los tamaños representados en esta tesina y para cualquier posición de la misma es despreciable. Entonces, el estudio de modos de la cámara emisora para el detector MODA-LS se puede realizar sin la presencia de burbujas. Para el caso 3, 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 (aumento de valores propios), entre el rango de los 252 Hz hasta los 1.4 kHz.

Para la cerámica

- Las f_r del modelo analítico es mayor al modelo numérico, ya que no se tienen en cuenta las pérdidas de la cerámica; así mismo, las cerámicas utilizadas no son completamente discos ni cilindros, no se ajustan completamente al ámbito de aplicabilidad de dichos modelos.

Para la capa de adaptación

- La onda acústica que se genera en el fluido sobrecalentado R134a, con una impedancia acústica (para cada una de las 3 presiones estudiadas) $Z_{i,1\text{bar}} = 1.0133 \text{ MRayls}$, $Z_{i,2\text{bares}} = 0.8875 \text{ MRayls}$, $Z_{i,3\text{bares}} = 0.80588 \text{ MRayls}$, que se recibe por la cerámica, con impedancia acústica $Z_t = 31.2$

MRays, y considerando las pérdidas propias de la cerámica se tiene que los índices de transmisión T_i son: $T_{i,1bar} = 0.12$, $T_{i,2bares} = 0.10$, $T_{i,3bares} = 0.09$. Se concluye que aproximadamente un 10% de la señal que se genera en el medio se transmite a la cerámica.

- Consciente de la importancia del uso de una capa de adaptación para que se haga progresiva la adaptación de impedancias, se tiene: Metacrilato $t=10$ mm presenta una frecuencia máx. en 70 kHz, y 200 kHz. Metacrilato $t=5$ mm presenta una frecuencia máx. 135 kHz. Se mejora el comportamiento del sensor en torno a estas frecuencias.

Para el encapsulado (Housing)

- El diseño de un encapsulado adecuado evita la influencia de ondas electromagnéticas reduciendo su amplitud, así como para aislar la cerámica y los cables del medio circundante.

Para los métodos de caracterización del sensor

- El modelo numérico (simulado) de la admitancia eléctrica con la cerámica libre, coincide bastante bien con la obtenida mediante la medida experimental con una $f_r=174$ kHz y 176 kHz respectivamente; en este pico de admitancia eléctrica se potencia el ancho de banda del sensor.
- Para la curva de *admitancia eléctrica* en las medidas experimentales de los sensores pegados a la cámara de burbujas, se observa que existe un desplazamiento hacia las altas frecuencias en el pico de admitancia, $f_r=177$ kHz y 182 kHz para el *sensor 1* y *sensor 2* respectivamente, y un aumento general de esta curva si se comparan con los sensores libres que presentan una $f_r=174$ kHz. Este aumento en la amplitud de la resonancia se debe a la influencia que el metacrilato (cámara de burbujas) ejerce como capa de adaptación (Matching layer) de los sensores, permitiendo una mejora de la adaptación de la impedancia de los medios. El valor de la frecuencia de resonancia del *sensor 2* es un poco mayor que el *sensor 1*.
- 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*.

- Realizada la calibración con chispas a través de la descarga de un condensador para los sensores pegados a la cámara de burbujas, se capturó cinco medidas de chispas, se obtuvo la señal acústica recibida por cada uno de los sensores y se presentó una correlación entre los diferentes voltajes para testear dicha calibración.
- Para el último montaje experimental; sensores pegados: calibración con hidrófono emisor, se obtiene la gráfica de *sensibilidad acústica (RVR)*, y se concluye que los valores de transmisión máxima (T_i) presentados en la *sección II.3.4* se corresponden acertadamente con las gráficas experimentales obtenidas. El *sensor 1* pegado en la cámara de burbujas, cuyo espesor de metacrilato es de 10 mm, presenta una mayor *sensibilidad acústica (RVR)* en la frecuencia de 82 kHz valor que se asemeja al modelo numérico (simulado) de 70 kHz. Para el *sensor 2*, pegado en la cámara de metacrilato con espesor de 5 mm, se tiene un máximo en la frecuencia de 124 kHz, valor próximo al modelo numérico de 135 kHz. Por lo tanto, los sensores presentan un buen desempeño para detector de partículas MODA-LS, y se testearán próximamente en el propio detector operando con líquido sobrecalentado.

Futuras líneas de investigación:

- Realizar medidas experimentales y calibrar la señal acústica que se genera por el crecimiento de una burbuja en el detector de partículas MODA-LS, donde se encuentran pegados los dos sensores acústicos. Testear la relación entre el grado de sobrecalentamiento del líquido y la amplitud de las ondas acústicas recibidas.
- Recibir las señales acústicas generadas en el interior de la cámara de burbujas y analizarlas a través de algoritmos matemáticos (transformadas) para determinar qué tipo de señales se reciben. Este proceso pretende realizarse calibrando las señales acústicas mediante diferentes fuentes de radiación.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar este trabajo fin de máster, debo manifestar mis más profundos agradecimientos a todas aquellas personas que hicieron posible la materialización de este trabajo, pues sus orientaciones y sugerencias dieron lugar al enriquecimiento de mis saberes. El intercambio de ideas y el rigor metodológico de mis tutores Juan Antonio Martínez Mora e Iván Felis Enguix ha sido un privilegio gratificante y significativo.

En este orden de ideas, doy gracias a Iván Felis por sus consejos y eficacia en el proceso de elaboración del presente trabajo, igual por sus revisiones y comentarios, tu dedicación inspira a llevarme siempre hacia la excelencia y dar lo mejor de mí. A Juan Antonio Martínez Mora por alentarme, estar atento en el desarrollo de este trabajo y realizar las correcciones pertinentes. Al grupo de investigación en *Acústica aplicada a la detección de Astropartículas*, por darme la oportunidad de colaborar en este proyecto. Gracias a quienes alentaron en mí, el afán de logro en un ambiente cordial y de las mejores calidades pedagógicas.

A la Universidad Politécnica de Valencia, por su enorme potencial académico e investigativo y por brindarme la oportunidad de hacer parte de ella en mi calidad de estudiante e incubando el sentido de la responsabilidad por hacer las cosas bien.

Gracias a Dios y a mi familia; a mi padre por cada palabra de ánimo, y en especial a mi madre quien me apoyó constantemente durante el desarrollo de esta tesina y de mis estudios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Amole, *Dark Matter Search Results from the PICO-60 CF3I Bubble Chamber*. Phys. Rev. D93, 052014. Año, 2016.
- [2] M. Bou Cabo, I. Felis, M. Ardid, *Acoustic studies for alpha background rejection in dark matter bubble chamber detectors*. AIP Conf. Proc. 1549, 142 (2013).
- [3] M. Saldaña, S. Adrián Martínez, M. Bou Cabo, I. Felis, G. Larosa, C.D Llorens, J.A. Martínez Mora, M. Ardid, *A search for Secluded Dark Matter in the Sun with the ANTARES neutrino telescope*. Article in Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. February 2016.
- [4] M Bou-Cabo, I. Felis, C. D. Llorens, J. A. Martínez Mora, M. Ardid, *Limits on Dark Matter Annihilation in the Sun using the ANTARES Neutrino Telescope*. Article in Physics Letters B. March 2016.
- [5] C. Amole, M. Ardid, D. M. Asner, D. Baxter, E. Behnke, P. Bhattacharjee, H. Borsodi, M. Bou-Cabo, I. Felis, *PICASSO, COUP and PICO - Search for dark matter with bubble chamber*. EDP Sciens 2015.
- [6] 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. Año, 2014.
- [7] C. Amole, *Dark Matter Search Results from the PICO-60 CF3I Bubble Chamber*. Phys. Rev. D93, 052014. 2016).
- [8] C. Amole, M. Ardid, D. M. Asner, D. Baxter, E. Behnke, P. Bhattacharjee, H. Borsodi, M. Bou Cabo, I. Felis and PICO Colaboration, *Dark Matter Search Results from the PICO-2L C3F8 Bubble Chamber, february 2015*.
- [9] R. Bertoni, F. Chignoli, D.Chiesa, M. Clemenza, G. Lucchini,R. Mazza, P. Negri(+), A. Pullia, N. Redaelli, L. Zanotti University and INFN of Milano Bicocca D. Cundy, *A new technique for direct investigation of dark matter*. University and INFN of Milano-Bicocca, IFSI Torino and CERN 7-11-(2013).
- [10] 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).
- [11] C. Amole, _ M. Ardid, I Felis, *Improved Dark Matter Search Results from PICO-2L Run-2*. Enero 15, 2016.
- [12] 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 273–275 (2016) 2354–2356.
- [13] Ivan Felis, Juan Antonio Martínez-Mora and Miguel Ardid, *Acoustic Sensor Design for Dark Matter Bubble Chambers Detectors*. Sensors 16(6), 860. (2016).

- [14] 21 E. Lemmno, M. McLinden y D. Friend, *Thermophysical Properties of Fluid Systems*. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database, P. Linstrom y W. Mallard, Edits., Gaithersburg MD, National Institute of Standards and Technology. Año, 2015.
- [15] L.E. Kinsler, *Fundamentals of acoustics*. 4ed, John Wiley & Sons, Inc. Año, 2000.
- [16] Manual de Comsol 3.5: Manual Structural Mechanics Module. Versión 3.5, Septiembre 2008.
- [17] Antônio Henrique Alves, *Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades* Pereira. 1° São Carlos – Brasil. Marzo de 2010.
- [18] Suslick, K.S., *The Chemical Effects of Ultrasound*. Scientific American February 1989.
- [19] Cady, W.G., *Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical phenomena in crystals*. McGraw-Hill. Año, 1946.
- [20] B. Jaffe, W. R. Cook Jr, H. Jaffe. *Piezoelectric Ceramics*. pp. 1-52. Año, 1971.
- [21] Piezoelectric ceramic <http://www.piceramic.de/site/piezo.html>.
- [22] Piezoelectric Ceramic Products, *Fundamentals, characteristics and applications*.
- [23] Jordi Ferrer i Ferrer, *Caracterización de sensores piezoeléctricos y capas de adaptación (matching layer) para detectores de partículas tipo PICO*. Tesis de máster Universidad Politécnica de Valencia. Gandía, España. Año, 2015.
- [24] Jorge Enrique Otero Vega, *Caracterización y simulación de cerámicas piezoeléctricas*. Tesis de Máster Universidad Politécnica de Valencia. Gandía, España. Año, 2015.
- [25] I. Felis, M. Ardid, M. Bou-Cabo and J. A. Martínez-Mora, *R&D Studies for the Development of Acoustic Sensors Fordark Matter Bubble Chamber Detectors*. 10 de noviembre, 2015.
- [26] Dr. Ing. Timo Sholehwar. *Caracterización de la estructura y las relaciones de las propiedades de los materiales piezoeléctricos PZT*. Año, 2010.
- [27] T.L Jordan, *Piezoelectric Ceramics Characterization*. National Aeronautics and Space Administration. Langley Research Center Hampton, Virginia 23681-2199.
- [28] Dr. Ing. Timo Sholehwar, *Caracterización de la estructura y las relaciones de las propiedades de los materiales piezoeléctricos PZT*. Año, 2010.
- [29] *Métodos computacionales de simulación*. Tema 5. Material ayuda de COMSOL. Para más información o detalles de implementación consultar el material de ayuda de COMSOL.
- [30] Morten Wollert Nygren, *Finite Element Modeling of Piezoelectric Ultrasonic Transducers*. Norwegian University of Science and Technology Department of Electronics and Telecommunications. Enero, 2011.
- [31] Kocbach J., *Finite Element Modeling of Ultrasonic Piezoelectric Transducers*. Department of Physics, University of Bergen: Bergen, Norway. Año, 2000.
- [32] Urick, R.J., 1983. *Principles of Underwater Sound*. Los Altos, California: Península Publishing.

- [33] Stewart Sherrit, Binu K. Mukherjee, *Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Pasadena, California, USA, ssherrit@jpl.nasa.gov., mukherjee@rmc.ca.
- [34] Chi-Hung Huang, Yu-Chih Lin, and Chien-Ching Ma. *Theoretical Analysis and Experimental Measurement for Resonant Vibration of Piezoceramic Circular Plates*.
- [35] Valeria M. do Nascimento, Vera Lúcia da S. Nantes Button, Joaquim M. Maia, Eduardo T. Costa, Eduardo J. V. Oliveira, *Influence of backing and matching layers in ultrasound transducer performance*. University of Campinas, Brazil.
- [36] George Kossoff, *The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Ceramic Transducers*. IEEE transaction on sonics and ultrasonics. Marzo, 1966.
- [37] T.D.Roosing, *Springer Handbook of acoustics*. Rossing. Año, 2007.
- [38] Valery Sharapov, *Piezoceramic sensor*. Editorial Springer. Año, 2011.
- [39] Soliveres Gonzalez Ester, *Estimación de biomasa de peces en granjas marinas mediante ultrasonido*. Universidad Politécnica de Valencia. Año, 2015.
- [40] 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. Año, 2015.

ANEXO

Ficha técnica de la cerámica

Piezotechnology



Material Coefficient PIC 255

Coefficient	Unit	Value	Coefficient	Unit	Value
Density	kg/m ³	7,80E+03	N1	Hzm	1420
Qm		80	N3	Hzm	1710
			N5	Hzm	1125
ϵ 11Tr		1649	Np	Hzm	2000
ϵ 33Tr		1750	Nt	Hzm	2000
ϵ 11Sr		930			
ϵ 33Sr		857	d31	m/V	-1,74E-10
			d33	m/V	3,94E-10
β 11T	Vm/As	6,85E+07	d15	m/V	5,35E-10
β 33T	Vm/As	6,45E+07			
β 11S	Vm/As	1,21E+08	g31	Vm/N	-1,13E-02
β 33S	Vm/As	1,32E+08	g33	Vm/N	2,54E-02
			g15	Vm/N	3,66E-02
tan δ		20,0E-3			
			e31	N/Vm	-7,15
k31		0,351	e33	N/Vm	13,70
k33		0,691	e15	N/Vm	11,90
k15		0,661			
kp		0,620	h31	N/As	-9,43E+08
kt		0,471	h33	N/As	1,81E+09
			h15	N/As	1,45E+09
Poisson (σ)		0,36			
s11E		1,590E-11	c11E	N/m ²	1,230E+11
s33E		2,097E-11	c33E	N/m ²	9,711E+10
s55E		4,492E-11	c55E	N/m ²	2,226E+10
s12E		-5,699E-12	c12E	N/m ²	7,670E+10
s13E		-7,376E-12	c13E	N/m ²	7,025E+10
s44E		4,492E-11	c44E	N/m ²	2,226E+10
s66E		4,319E-11	c66E	N/m ²	2,315E+10
s11D		1,393E-11	c11E	N/m ²	1,298E+11
s33D		1,096E-11	c33E	N/m ²	1,220E+11
s55D		2,532E-11	c55E	N/m ²	3,949E+10
s12D		-7,660E-12	c12E	N/m ²	8,345E+10
s13D		-2,945E-12	c13E	N/m ²	5,729E+10
s44D		2,532E-11	c44E	N/m ²	3,949E+10
s66D		4,319E-11	c66E	N/m ²	2,315E+10

Values are only for information - no specification!

Simulation purpose

The data in the table was determined using testbodies with geometries and dimensions in accordance with European Standard EN 50324 2, and are typical values.

Singular parameters can deviate from catalogue values, because they were measured samples which were taken from one block of ceramics according to the sequence of IEC483 to get maximum consistency.

Catalogue values reflect the statistical distribution of each individual specification in production and therefore also take into account spreading from material batch to material batch.