

ESTUDIO DE LA MEJORA DE SENSIBILIDAD DE UN SENSOR PIEZOELÉCTRICO ENCAPSULADO UTILIZANDO RESONADORES ACÚSTICOS Y BOCINAS

PACS: 43.38.FX

Sáenz de Inestrillas, A.¹; Barreiro, J.M.¹; Camarena, F.²; Rodríguez, J.¹

¹ Depto. Física Aplicada, Escola Politècnica Superior de Gandia (EPSG),

Universitat Politècnica de València (UPV)

Paraninf 1, 46730 Grau de Gandia (Valencia), España

Email: alsaedei@epsq.upv.es (A.S.d.I.), jbarreiro@academia.usbbog.edu.co (J.M.B.),

jorodsen@espg.upv.es (J.R.)

² Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M),

Universitat Politècnica de València (UPV), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Camino de Vera s/n

46022 Valencia, España

Tel: 96 284 9300 (ext. 43148)

E-mail: fracafe@fis.upv.es

Palabras clave: acoustic sensor, piezoelectric ceramic, encapsulated transducer, piezoelectric FEM simulation, explosive atmospheres, Helmholtz resonator, acoustic horn.

ABSTRACT

One of the maintenance tasks in biofuel tanks is the detection of leaks using pressure differential techniques between in and out of the tanks to produce airflow. This airflow produces a sound with frequencies between 1 kHz and 10 kHz, usually of low intensity. For the detection of such signals, electromagnetically isolated devices with good sensitivity are required in the frequency range quoted. In this work the design of encapsulated unimorph type piezoelectric sensors is resumed, increasing their sensitivity in the desired range by an order of magnitude with acoustic resonators and horns.

RESUMEN

Una de las labores de mantenimiento en tanques de hidrocarburos es la detección de fugas utilizando técnicas de diferencia de presión entre dentro y fuera de los tanques para producir flujo de aire. Este flujo de aire produce un sonido con frecuencias entre 1 kHz y 10 kHz, generalmente de baja intensidad. Para la detección de dichas señales son necesarios dispositivos aislados electromagnéticamente con una buena sensibilidad en el rango de frecuencias citado. En este trabajo se retoma el diseño de sensores piezoeléctricos tipo unimorph encapsulados a los que se les aumenta su sensibilidad en el rango deseado un orden de magnitud con resonadores acústicos y bocinas.

1. Introducción

En la industria de los combustibles fósiles se hace necesario conservar el combustible en tanques de almacenamiento. Debido al paso del tiempo y las condiciones en las que se encuentran, es imprescindible realizar un mantenimiento de dichos depósitos para garantizar la durabilidad y la estanqueidad de los mismos. Sin embargo, dicha estanqueidad puede verse truncada por la aparición de grietas por las que puede escaparse el combustible, lo cual produce pérdidas económicas considerables. Estas fugas pueden detectarse con técnicas de diferencia de presiones entre dentro y fuera del tanque y detección acústica ya que, creando un vacío de presión el interior del tanque, se crea un flujo de aire a través de la apertura [1,2]. En el caso de que la fuga sea en una zona donde no haya combustible dentro se contará con un ruido producido por el flujo de aire mientras que, en el caso de que la fuga exista donde quede combustible, el flujo de aire al entrar en el fluido creará un burbujeo. Dependiendo de la aplicación, el rango frecuencial de interés varía, así como los órdenes de magnitud del ruido a medir [3,4]. Debido al medio de aplicación (atmósfera explosiva), el sensor utilizado debe estar encapsulado dentro de una Jaula de Faraday que evite al dispositivo emitir ondas electromagnéticas al medio.

Existen diversos tipos de micrófonos capaces de registrar las señales acústicas producidas por las fugas anteriormente citadas, como los electrostáticos [5], los cuales se desestiman en este trabajo debido a que deben estar polarizados eléctricamente; tampoco se creen útiles los micrófonos de bobina móvil [5] para el propósito de este trabajo por el descenso de sensibilidad que sufrirían al encapsularlos; muy extendidos están hoy en día los Sistemas Micro ElectroMecánicos (MEMS) [6] y también los Transductores Ultrasónicos Micromecánicos Piezoeléctricos (PMUT) [7]. Sin embargo, no son válidos para el propósito del trabajo por su menor robustez. Por el contrario, en [8] se optó por el diseño y construcción de unos dispositivos unimorph [9] con encapsulamiento metálico, los cuales cumplían con las especificaciones de diseño requeridas en cuanto a rango frecuencial de funcionamiento y protección electromagnética, para afrontar el problema requerido. Mejorar la sensibilidad de estos dispositivos en determinadas zonas del ancho de banda requerido supondría una mejora considerable en la capacidad de detección de fugas propuestas.

En este trabajo se retoma el diseño de [8], el cual se modifica para obtener una mayor sensibilidad en el rango frecuencia de 1 a 2 kHz, que es el ancho de banda de una señal detectada para una pérdida de 0.2 mm de diámetro en un tanque en el cual se aplica una descompresión de -200 mbar. La modificación consiste en el uso de resonadores acústicos [10], los cuales son usualmente utilizados en buzzers para ganar sensibilidad, y bocinas acústicas [11], que son más utilizadas en altavoces y motores de compresión. Las modificaciones son realizadas a través de simulaciones por elementos finitos (FEM).

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 1 introduce el problema práctico y las posibles soluciones que se tuvieron en cuenta, así como la opción tomada; la Sección 2 presenta los modelos teóricos de las soluciones planteadas para el aumento de la sensibilidad de los dispositivos a mejorar, en primer lugar el resonador acústico y en segundo

las bocinas; en la Sección 3 son expuestos métodos de caracterización de los nuevos dispositivos y los nuevos diseños; en la Sección 4 se muestran los resultados de las simulaciones; y en la Sección 5 se muestran las conclusiones obtenidas y líneas futuras.

2. Modelo Teórico

2.1 Resonador de Helmholtz

El Resonador de Helmholtz es un sistema acústico que consta de dos elementos: una cavidad rígida y un cuello (Figura 1a). Las frecuencias a las que una cavidad de este tipo se comporta como un resonador son aquellas que cumplen que $\lambda \gg L$, $\lambda \gg S^{1/2}$, y $\lambda \gg V^{1/3}$. Siendo L y S la longitud y el área del cuello y V el volumen de la cavidad. Cuando se cumplen estas condiciones, el aire del interior del cuello se comporta como una masa que empuja al aire del interior del volumen, el cual se comporta como un muelle que, al comprimirse, añade rigidez. A bajas frecuencias, una apertura circular de radio a está cargada con una masa de radiación igual a la del fluido contenido en un cilindro de área πa^2 y longitud $0.85a$ si el borde está achaflanado y $0.6a$ si es un borde rectangular. Por lo tanto, a la longitud del cuello es necesario realizarle una modificación debida a los dos extremos, quedando una longitud efectiva de:

$$L' = L + 1.7a \text{ (extremos achaflanados)} \quad (1)$$

$$L' = L + 1.4a \text{ (extremo rectangular)} \quad (2)$$

La frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz viene dada por:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}} \quad (3)$$

donde f_0 es la primera frecuencia de resonancia del sistema y c es la velocidad del sonido.

Siguiendo con el modelo de transductor diseñado en [8] y el objetivo de que funcione en el rango de 1 kHz a 2 kHz, un resonador con un cuello cilíndrico de altura 1 mm y radio 0.35 veces el radio de la placa del transductor, con un volumen interior de $1.34 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, escogiendo el transductor de 15 mm de radio de placa, se obtiene una frecuencia de resonancia de unos 1500 Hz.

2.2 Bocinas Acústicas

Una bocina es un dispositivo acústico que consta de un tubo en el cual el área de la sección cambia y cuyo objetivo es acoplarlo a un generador acústico para mejorar su eficiencia. El motivo por el que se mejora la sensibilidad de un altavoz con una bocina es porque actúa como una capa de adaptación de impedancias acústicas entre el transductor y el medio, sobre todo a bajas frecuencias, donde la longitud de onda es grande en comparación al tamaño del diafragma, creando un frente de ondas plano en lugar de esférico. De esta forma se consigue que la impedancia acústica en la garganta de la bocina esté más influenciada por la componente resistiva que la reactiva [11]. El parámetro que las caracteriza es la impedancia acústica característica en la garganta. Existen distintos tipos de bocina según la forma en la que varían su

sección, siendo las exponenciales de las más empleadas [11]. La línea exponencial que sigue su sección viene determinada por:

$$S = S_1 e^{mx} \quad (4)$$

siendo:

- $m=2k$: constante de ensanchamiento de la exponencial que sigue la bocina
- $k=2\pi f/c$
- S : valor de la sección para cada valor de x
- S_1 : área en la garganta o $x=0$

Otro parámetro por el que se caracterizan también este tipo de bocinas es la frecuencia de corte que es la frecuencia a la cual la bocina tiene mayor componente resistiva que reactiva y, por lo tanto, comienza a emitir. Para una bocina infinita exponencial la frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{mc}{4\pi} \quad (5)$$

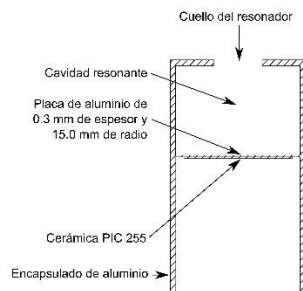
siendo m la constante de ensanchamiento de la exponencial que sigue la bocina.

De nuevo escogiendo el diseño de [8], para un valor de $m=36$, a través de (5) se tiene una frecuencia de corte de 1 kHz.

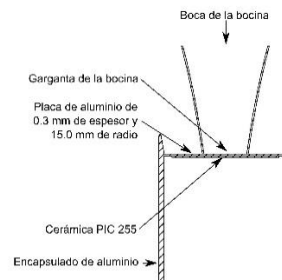
3. Diseños y Métodos

3.1 Diseños

Los diseños creados en este estudio se fundamentan en los modelos realizados en [8], que son transductores cilíndricos con una placa vibrante de distintos materiales a la que se adhiere una cerámica piezoeléctrica PIC255 de 0.3mm de espesor y 10.0 mm de radio de la compañía PI Ceramic (Lindenstrasse, Lederhose, Alemania). Pese a los distintos modelos de transductor presentados en [8], únicamente se considera el modelo de 0.3 mm de espesor y 15.0 mm de radio de placa, soportada por un cilindro de 1.0 mm de espesor y 40.0 mm de altura realizado en aluminio (densidad 2700 kg/m³, módulo de Young 70 GPa y coeficiente de Poisson 0.33). Siguiendo este modelo, en este estudio se mejora la sensibilidad final de los dispositivos originales añadiendo resonadores de Helmholtz y bocinas acústicas, con varios diseños de cada uno de ellos, cuyos esquemas se muestran en Figura 1a y Figura 1b respectivamente. Para los resonadores se utilizan unas paredes del mismo grosor que el cilindro original (1.0 mm). El radio de S varía entre 0.2 y 0.4 veces el radio de la placa y la altura de la cavidad se calcula para obtener una frecuencia de resonancia de 1.5 kHz según (3). También se realiza el diseño de un resonador sintonizado a 1.25 kHz y otro a 1.75 kHz con un radio de sección de cuello de 0.3 veces el radio de la placa. En cuanto a las bocinas se realiza el estudio de distintas geometrías de bocinas pegadas a la propia placa manteniendo constante el espesor de la propia bocina a 1 mm y con $m=36$. El estudio se realiza variando la altura de la bocina entre 20 mm y 50 mm. Para cada altura simulada, se varía además el radio de la garganta entre 1 mm y 8 mm. También se realiza un estudio variando m con unas dimensiones de radio de garganta y altura específicas.



(a)



(b)

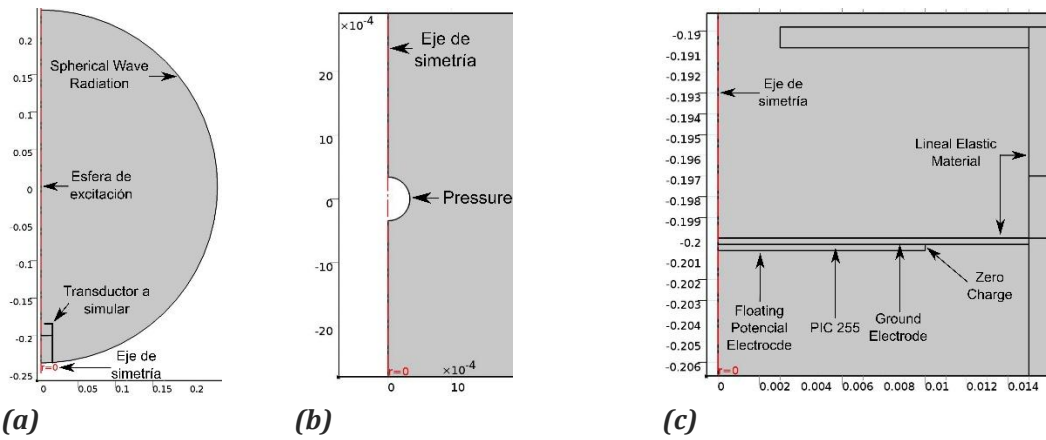
Figura 1: **a)** esquema de un transductor con resonador de Helmholtz; **b)** esquema de un transductor con bocina acústica

3.2 Simulaciones por Elementos Finitos

El software COMSOL Multiphysics 4.4 (COMSOL, Stockholm, Suecia) y su módulo de Acoustic-Piezoelectric Interaction es el utilizado en este trabajo para la realización de las simulaciones por elementos finitos, mediante las cuales se obtienen los valores de sensibilidad de los dispositivos diseñados. Al igual que ocurría en [8], mediante las ecuaciones que se introducen en el Apartado 2, se tienen unos valores de referencia de las frecuencias de resonancia de los dispositivos a analizar, pero a través de las simulaciones es posible obtener resultados más realistas debido a la capacidad de realizar análisis multifísica.

En el entorno de simulación se utiliza simetría de revolución y se recrea un medio donde una esfera pulsante con condición de contorno Pressure localizada en el centro radia ondas acústicas de 100 Pa hacia el lugar donde está colocado el transductor. La esfera tiene un radio 100 veces menor que la longitud de onda más pequeña a simular (10 kHz). El medio es media circunferencia de radio 237 mm compuesta por aire (densidad 1.2 kg/m³ y velocidad del sonido 343 m/s). Los extremos de esta media circunferencia están configurados con una condición de contorno de Spherical Wave. La distancia de separación entre la parte frontal de la placa de los transductores y el centro de la excitación es de 200 mm de forma que la relación entre el radio de la placa y la longitud de un arco de igual altura sea menor a 0.999. Este método de simulación utiliza más recursos que las simulaciones anteriores ya que se recrea todo el medio de propagación del sonido sobre media circunferencia y el método expuesto en [8] únicamente necesita la estructura del transductor a la cual se le ejerce una presión directamente sobre la placa. Sin embargo, con el método utilizado en [8] no es posible simular otras geometrías porque la presión no actúa de forma igual en toda la placa. La Figura 2 muestra las condiciones de contorno de las simulaciones.

Para obtener el resultado final de sensibilidad de los diferentes diseños se toma el promedio de presión que llega a la placa del transductor diseñado en [8], de forma que pueda utilizarse como presión de referencia. Después los elementos pasivos propios de este estudio son implementados. Los voltajes obtenidos en los bornes del piezoeléctrico son divididos por la presión de referencia para llegar a los valores de sensibilidad finales.

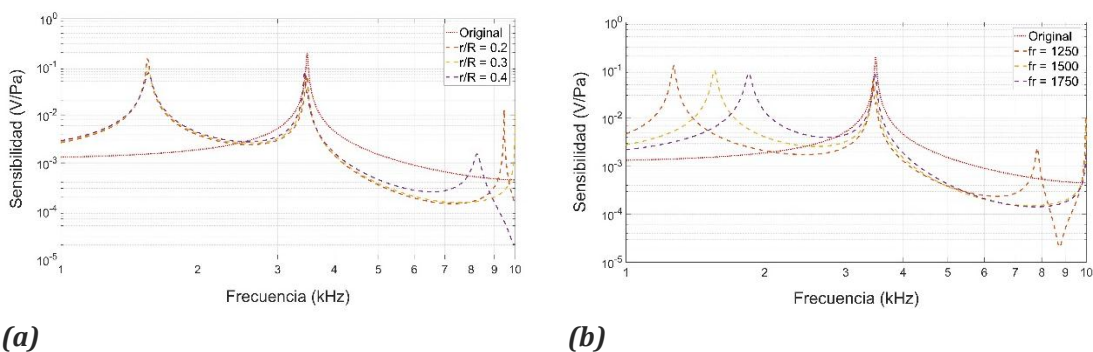


(a) entorno de simulación completo; **(b)** esquema y configuración de la esfera pulsante de excitación; **(c)** esquema y configuración de un transductor con resonador

4. Resultados y Discusión

4.1 Diseños con resonadores de Helmholtz

En la Figura 3a se muestran los resultados de simulación obtenidos tras variar la relación entre el radio de la sección del cuello del resonador con respecto al radio de la placa, manteniendo fija la frecuencia de resonancia del resonador a 1.5 kHz. En la zona de interés (1 kHz a 2 kHz) la sensibilidad aumenta con respecto a la sensibilidad simulada del dispositivo original hasta 144.8 mV/Pa en el pico de resonancia de la cámara en el caso del transductor con relación $r/R = 0.2$. Sin embargo, a partir de 2.4 kHz, la sensibilidad baja con respecto al diseño original, manteniendo valores similares entre los tres diferentes modelos hasta sobrepasar la frecuencia de resonancia de la placa (3.5 kHz). A partir de esta última resonancia, cada uno de los dispositivos desciende su sensibilidad hacia unos terceros picos de resonancia que, dependiendo de la relación r/R se ubican más abajo o más arriba en el espectro frecuencial y, por lo tanto, las curvas descienden más o menos rápido.



(a) sensibilidad con los distintos resonadores y frecuencia de resonancia 1.5 kHz y modificando la relación entre r y R ; **(b)** sensibilidad de los distintos resonadores con relación $r/R = 0.3$ y variando la frecuencia de resonancia

En la Figura 3b aparecen los resultados de las simulaciones donde se ha mantenido constante la relación $r/R=0.3$ pero se ha variado el volumen. Las frecuencias a las que se han sintonizado los

resonadores son 1.25 kHz, 1.5 kHz y 1.75 kHz. En el rango de interés todos los resonadores aumentan la sensibilidad del sistema, hasta un máximo de 123.4 mV/Pa el resonador sintonizado a 1.25 kHz. Por el contrario, en la zona cercana a la frecuencia de resonancia de la placa, la sensibilidad es menor en comparación al transductor original. En cuanto a la sensibilidad después de la frecuencia de resonancia de la placa, las sensibilidades vuelven a descender drásticamente con respecto a la sensibilidad del transductor original. En la Tabla 1 aparecen los valores medios de cada una de las simulaciones realizadas con resonadores de Helmholtz en el rango de 1 kHz a 2 kHz. Estos valores muestran como la sensibilidad de cualquiera de los transductores diseñados supera la del transductor original, llegando a aumentarla hasta en 12.4 mV/Pa en el caso del transductor con resonador sintonizado a 1.5 kHz y una relación r/R de 0.2.

Fr = 1.5 kHz, r/R = 0.2	Fr = 1.5 kHz, r/R = 0.3	Fr = 1.5 kHz, r/R = 0.4	Fr = 1.25 kHz, r/R = 0.3	Fr = 1.75 kHz, r/R = 0.3	Original
14.0 mV/Pa	13.1 mV/Pa	12.8 mV/Pa	11.4 mV/Pa	13.7 mV/Pa	1.6 mV/Pa

Tabla 1: Sensibilidad promedio del transductor para diferentes geometrías de cámara de resonancia.

4.2 Diseño con Bocinas

En Figura 4 se observa la sensibilidad obtenida para las simulaciones con bocina en las cuales se ha fijado $m = 36$. En todos los resultados la frecuencia de resonancia del sistema ha descendido con respecto al transductor original debido a la masa adicional que supone la nueva estructura acoplada, siendo menor cuanto mayor es la altura de la bocina. Para una altura de bocina de 20 mm, la sensibilidad de los transductores no ha aumentado en el rango de interés, sino que es inferior para las bocinas con un radio de garganta igual o superior a 6 mm, tal y como se observa en Figura 4a. El valor de sensibilidad promedio con estas dimensiones únicamente supera al transductor original para valores de radio de garganta inferiores a 4 mm ya que, las frecuencias de resonancia del sistema están fuera de la región de interés. Con una altura de 30 mm de bocina, la sensibilidad de los transductores sigue sin superar la sensibilidad original en todo el rango de interés tal y como se observa en Figura 4b, salvo en el caso del transductor con bocina de radio de garganta 2 mm, el cual consigue superar en todo el espectro de interés los valores originales. En cuanto a la media de sensibilidad en el espectro de interés, todos están por encima de los valores originales, aunque en el mismo orden de magnitud como se observa en Tabla 2. Los demás resultados (Figura 4c y Figura 4d) están todos por encima de los niveles de sensibilidad originales llegando a aumentar en la resonancia hasta 2458,4 mV/Pa en el caso de la bocina de 50 mm de altura y 6 mm de radio de garganta. Los valores promedio en el rango de interés también son mayores aumentando hasta 123.0 mV/Pa con respecto al valor medio del transductor original, tal y como se muestra en la Tabla 2.

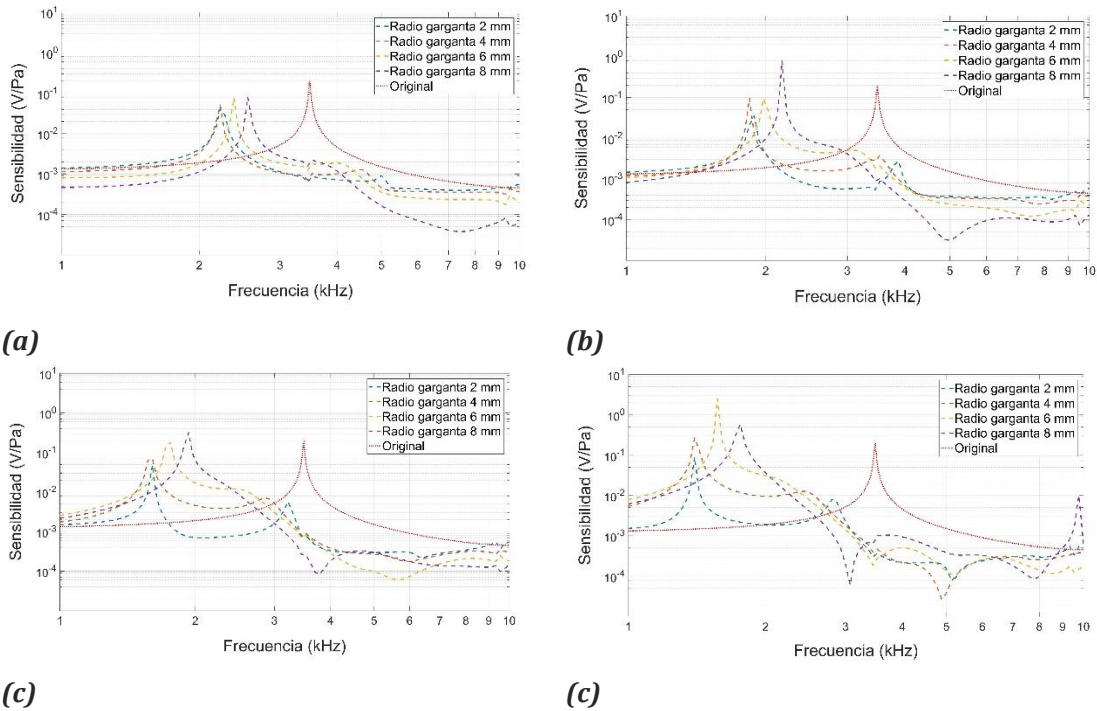


Figura 4: sensibilidad con las bocinas y $m = 36$; **a)** bocina de 20 mm de alto; **b)** bocina de 30 mm de alto; **c)** bocina de 40 mm de alto; **d)** bocina de 50 mm de alto.

	Garganta 2 mm	Garganta 4 mm	Garganta 6 mm	Garganta 8 mm	Original
Altura 20 mm	2.0 mV/Pa	1.6 mV/Pa	1.0 mV/Pa	0.6mV/Pa	1.6 mV/Pa
Altura 30 mm	4.5 mV/Pa	6.0 mV/Pa	7.8 mV/Pa	2.5 mV/Pa	
Altura 40 mm	3.8 mV/Pa	10.2 mV/Pa	23.3 mV/Pa	27.7 mV/Pa	
Altura 50 mm	6.2 mV/Pa	29.5 mV/Pa	124.6 mV/Pa	66.1 mV/Pa	

Tabla 2: sensibilidad promedio en el rango de 1 kHz a 2 kHz para las simulaciones de bocinas con $m = 36$.

De acuerdo a la Figura 4 y a la Tabla 2, puede observarse una gran mejora de la sensibilidad con una combinación de dimensiones de radio de garganta de 6 mm y altura de bocina de 50 mm. En la Figura 5 se muestra qué tanto puede mejorar la sensibilidad del transductor con una bocina de esas dimensiones, cuando se varía m . La frecuencia de resonancia disminuye conforme el parámetro es mayor. Este dato es relevante ya que en (5) se deduce que conforme se aumenta m la frecuencia de corte aumenta, con lo que los resultados son contrarios a (5). Sin embargo, es importante destacar dos cosas: las dimensiones son pequeñas en comparación a las dimensiones corrientes y que entre mayor sea dicho coeficiente mayor es la apertura de la curva de la bocina, por lo tanto, mayor área de captación.

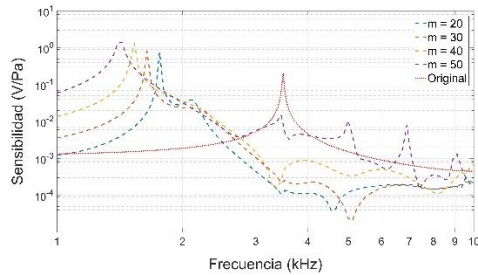


Figura 5: sensibilidad del transductor con bocina de altura 50 mm y radio de garganta de 6 mm.

m = 20	m = 30	m = 40	m = 50	Original
37.9 mV/Pa	50.6 mV/Pa	114.8 mV/Pa	249.4 mV/Pa	1.6 mV/Pa

Tabla 3: valores de sensibilidad promedio en el rango de 1 kHz a 2 kHz para transductores con bocinas de 50 mm de altura y radio de garganta de 6 mm variando el parámetro m.

5. Conclusiones y Líneas Futuras

En este trabajo se ha seguido la línea de investigación iniciada en [8] con el objetivo de mejorar la sensibilidad en el rango frecuencial de 1 a 2 kHz utilizando dispositivos acústicos, los cuales no añaden electrónica ni tensiones eléctricas adicionales. El trabajo se ha realizado por completo a través de simulaciones por elementos finitos que involucran la interacción acústica entre fluido-estructura y piezoelectricidad. Los resultados de estas simulaciones, tal y como sucedía en [8], no son fiables en valores de magnitud, pero pueden ser utilizadas para el estudio previo a la construcción de los mismos porque describen el comportamiento con respecto al transductor original. Para el estudio de los resonadores se ha llevado a cabo dos tipos de simulaciones: una donde se mantiene fija la frecuencia de resonancia de la cavidad resonante y se varía la relación entre el radio del cuello de los resonadores y el radio de la placa; y otra donde se ha mantenido fija la relación r/R a un valor de 0.3 y se han variado las dimensiones del volumen interno para conseguir distintas frecuencias de resonancia. En los dos estudios se han obtenido valores medios de sensibilidad en el rango de interés de un orden de magnitud superior al del resonador original. Sin embargo, este valor es menor cuanto mayor es la relación r/R . En el segundo estudio se ha obtenido que el valor medio de sensibilidad del transductor con resonador en el rango de interés desciende conforme la frecuencia de resonancia de la cavidad se aleja de la frecuencia de resonancia de la placa del transductor. Con respecto a las bocinas, no hay una relación lineal entre el alto de la bocina o el radio de la garganta y la sensibilidad. Si se puede observar que a medida que la bocina se hace más grande, las frecuencias de resonancia del transductor disminuyen, debido a la masa que se le aporta al sistema y que entre más grande es el coeficiente de la (5), mejora la sensibilidad y aumentando su ancho de banda después de la frecuencia de resonancia.

A través de este trabajo se ha obtenido información importante sobre el diseño de nuevos dispositivos con mayor sensibilidad. Sin embargo, el trabajo está basado en información obtenida a través de simulaciones numéricas que no están validadas con los dispositivos reales.

Por lo tanto, en futuros trabajos sería importante realizar simulaciones más realistas añadiendo las pérdidas producidas por el pegado de la cerámica con la cápsula metálica. Además, para estas nuevas simulaciones se ha utilizado como presión de referencia para obtener la sensibilidad la presión que llega a la placa del transductor original. Por lo tanto, es necesario contrastar las simulaciones con medidas reales de forma que pueda validarse este método.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero del Plan Estatal de Investigación, ref. FPA2015-231 65150-C3-2-P (MINECO/FEDER), Programa para la promoción de empleo joven e implantación de la garantía juvenil en I+D+i (PEJ-2014-A-66083), y Generalitat Valenciana AICO2016-108, así como a la Universitat Politècnica de València por prestar sus instalaciones y equipos.

Contribución de los autores: F.C. concibió los diseños y A.S.d.I y J.M.B. los han desarrollado y realizado las simulaciones; A.S.d.I. y J.M.B. han realizado el procesamiento de los datos simulados; A.S.d.I., J.M.B. y J.R. han procesado los datos; A.S.d.I., J.M.B., F.C. y J.R. han escrito el artículo.

Conflicto de interés: Los autores no declaran ningún conflicto de interés.

Bibliografía

1. Bogle, T.G.; Tuma, J.E.; Williams, B.N. Method of Confirming the Presence of a Leak in a Liquid Storage Tank. U.S. Patent 5,319,956, 14 June 1994.
2. Adams, T.E. Tank Leakage Detection Method. U.S. Patent 4,462,249, 31 July 1984.
3. Horowitz, S.; Nishida, T.; Cattafesta, L.; Sheplak, M. Development of a micromachined piezoelectric microphone for aeroacoustics applications. *J. Acoust. Soc. Am.* **2007**, *122*, 3428–3436.
4. Lu, B.; Upadhyaya, B.R.; Perez, R.B. Structural integrity monitoring of steam generator tubing using transient acoustic signal analysis. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **2005**, *52*, 484–493.
5. Eargle, J. *The Microphone Book*, 2nd ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2005; Chapters 3–5.
6. Williams, M.D. Development of a MEMS Piezoelectric Microphone for Aeroacoustic Applications. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2011.
7. Qiu, Y.; Gigliotti, J.V.; Wallace, M.; Griggio, F.; Demore, C.E.M.; Cochran, S.; Trolrier-McKinstry, S. Piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducer (PMUT) Arrays for Integrated Sensing, Actuation and Imaging. *Sensors* **2015**, *15*, 8020–8041.
8. Sáenz de Inestrillas, A.; Camarena, F.; Bou Cabo, M.; Barreiro, J.M. Design and Performance of a Metal-Shielded Piezoelectric Sensor. *Sensors* **2017**, *17*, 1284.
9. Galiano, G.; Lamberti, N.; Iula, A.; Pappalardo, M. A piezoelectric bimorph static pressure sensor. *Sens. Actuators A Phys* **1995**, *46*, 176–178.
10. Kinsler, L.E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B.; Sanders, J.V. *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2000; Chapter 10.
11. Olson, H.F. *Acoustical Engineering*. 2nd ed.; D. Van Nostrand Company, INC.: Princeton, NJ, USA, 1960; Chapters 2, 5 and 7.