

DISEÑO DE UN SENSOR ACÚSTICO - PIEZOELECTRICO CON ENCAPSULADO METÁLICO

PACS 43.38; 43.40; 43.58

J. Barreiro¹, A. Sáenz de Inestrillas¹, and F. Camarena¹

¹Universitat Politècnica de València.

Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de les Zones Costaneres.

* EPSG. C/Paranim 1

46730 Grau de Gandia.

E-mail: fcamarena@fis.upv.es

ABSTRACT

A methodology to design and characterize a piezoelectric transducer in reception that works in audible range between 1 KHz to 10 KHz is proposed. A piezoelectric ceramic is forced to operate outside of its own piezo-acoustic resonance frequencies, but getting signal when it is attached to thin metal plate through natural resonance frequencies of the system or Eigenfrequencies, which are defined from input parameters such as Young Modulus, Poisson coefficient, material densities and the equations that described the vibrations in plates. This calculation procedure is later validated by FEM simulations and contrasted with the manufacturing and sensitivity measurements of some designs.

RESUMEN

Se propone una metodología de diseño y caracterización en recepción de un transductor piezoeléctrico, operando en rango audible entre 1KHz y 10KHz, obligando a una cerámica piezoeléctrica a trabajar por fuera de sus frecuencias propias de resonancia piezo-acústicas, pero obteniendo señal cuando la misma es unida a una placa metálica de poco espesor, a través de las frecuencias naturales de resonancia del sistema, las cuales están definidas a su vez a partir de parámetros de entrada como el módulo Young, coeficiente de Poisson, densidades de material y las ecuaciones que describen las vibraciones en placas. Este procedimiento de cálculo es posteriormente validado con simulación por elementos finitos y contrastado con la fabricación de algunos diseños de transductores.

1. INTRODUCCIÓN.

En determinadas condiciones, como puede ser en presencia de atmósferas explosivas o entornos en los que se requiera una baja densidad de campos electromagnéticos, disponer de un micrófono cuya carcasa exterior funcione como una jaula de Faraday, es decir, impidiendo la emisión de campos electromagnéticos al exterior durante el proceso de conversión de energía acústica en energía eléctrica, es la única opción para poder realizar medidas de caracterización sonora. En un micrófono de condensadorⁱ ⁱⁱ, el principio de funcionamiento

consiste, precisamente, en aprovechar las vibraciones producidas por las ondas acústicas en una placa metálica, sin embargo, esta placa debe de ser de un grosor muy pequeño (micras), lo que lo convierte en un sensor demasiado delicado para ciertos entornos y, además, estos micrófonos necesitan pre-polarización, lo que es completamente contraproducente para trabajar en atmósferas explosivas. Por otra parte, los tradicionales micrófonos electromagnéticos son difíciles de encapsular, y su sensibilidad se vería considerablemente mermada en el mejor de los casos. Otros sistemas de transducción electroacústicos más modernos, como son los transductores ópticos y mems (sistemas microelectromecánicos) ⁱⁱⁱ ^{iv} resultan bastante interesantes, pero el alto costo en componentes electrónicos para la transmisión y procesamiento de señal, así como la dificultad para operar con ellos, hacen que sean descartados en la práctica.

En el presente trabajo se propone la utilización de cerámicas piezoeléctricas para fabricar un sensor acústico, el cual no involucra en su construcción complejos componentes electrónicos (de ahí su bajo costo), no requieren voltajes de polarización externos, sus componentes mecánicos son de fácil manipulación y mecanizado, y pueden ser fácilmente encapsulados. Las aplicaciones de este tipo de transductores están enfocadas principalmente al campo de los ultrasonidos [ref], pues las propiedades electromecánicas y mecánicas-acústicas de las cerámicas piezoeléctricas fijan sus frecuencias propias de resonancia en dicho rango espectral, lo que define un rango de sensibilidad plana a frecuencias por encima de los 20 KHz. Además, este tipo de sistemas suele utilizarse para la construcción de hidrófonos (sensores acuáticos), debido a que existe una mejor compatibilidad de sus impedancias acústicas (cerámica-agua), favoreciendo la transmisión o recepción de señales, que en el caso del aire. Sin embargo, en este trabajo se propone la construcción de un transductor piezoeléctrico encapsulado operando en aire en el rango audible entre 1 KHz y 10 KHz (es decir, un micrófono piezoeléctrico). Para ello, se forzará a la cerámica piezoeléctrica a trabajar por fuera de sus frecuencias propias de resonancia mecano-acústicas, y se obtendrá la señal eléctrica a través de las frecuencias de resonancias mecánicas del sistema, esto es, la oscilación de una placa circular que forma parte del encapsulado o jaula de Faraday.

En el apartado 2 se expondrán los principios físicos que explican el funcionamiento vibracional de membranas fijas a través de las propiedades mecánicas de un material, como son el módulo de Young, coeficiente de Poisson y densidades de material. Posteriormente, a través del método de elementos finitos, se realizará un estudio más exhaustivo del funcionamiento del sistema total propuesto, teniendo en cuenta las propiedades piezoeléctricas de la cerámica utilizada, de modo que se obtengan curvas de sensibilidad aproximadas del sistema dependiendo del tamaño tanto de la placa metálica como de la cerámica acoplada. Una vez realizados los diseños finales a través de la simulación, en el apartado final, se detallan y comparan los resultados experimentales obtenidos tras la construcción de dos sensores de diferentes dimensiones, y se discute acerca de los resultados obtenidos en cuanto a la validación de modelos por simulación y su uso para un caso aplicado a la detección de espectros estrechos de señal en rango audible.

2. MODELO FÍSICO DEL DISEÑO PROPUESTO

La restricción del encapsulamiento metálico del sensor y la decisión de utilizar cerámicas piezoeléctricas como material activo fuerza a la utilización de un diseño para nuestro sensor muy específico. Por un lado, este diseño debe de permitir que seamos capaces de registrar las vibraciones producidas en el encapsulamiento por la onda acústica, y por otro, debemos de poder registrar señales de baja frecuencia [entre 1 y 10 KHz]. Sin embargo, las cerámicas piezoeléctricas que pueden utilizarse para construir un sensor de estas características tienen asociadas frecuencias naturales de oscilación muy por encima de los 10 KHz, (modos de trabajo en espesor, radial, longitudinal, transversal o cizalla de una cerámica piezoeléctrica), lo cual implica que la respuesta plana del micrófono estaría bastante alejada del rango audible que es de nuestro interés.

Con el fin de cumplir con ambos requisitos se propone utilizar la propia vibración de una parte del encapsulamiento (la placa circular frontal, ver Fig. 1) para deformar la cerámica piezoeléctrica, que estaría adherida mediante una resina rígida a la placa.

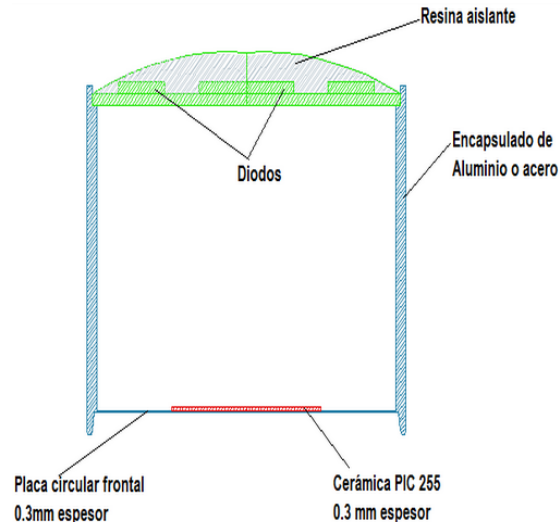


Figura 1.- Esquema del diseño de sensor piezoeléctrico propuesto

Las frecuencias propias de oscilación de una placa metálica circular sujeta por su extremo exterior puede calcularse analíticamente [7]. Estas frecuencias dependen de la rigidez de la propia placa, así como de la densidad volumétrica del material y sus dimensiones, y viene dada por la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{g_n^2}{2\pi} \frac{d}{\sqrt{12}} \left(\frac{\gamma}{\rho(1-\sigma^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde f_n es la frecuencia del modo n en Hertzios, d es el espesor de la placa en m, γ es el módulo de Young del material medido en Pa, ρ es la densidad volumétrica del material en kg/m^3 , σ es el coeficiente de Poisson, y $g_n \approx \frac{n\pi}{\alpha}$ donde α es el radio de la placa en metros. Los valores de este último parámetro surgen de la condición de contorno exigida (nodo en $r=a$), que exigen que $\text{sgn}(J_0(ga)) \neq \text{sgn}(J_1(ga))$ donde J_0 y J_1 son las funciones de Bessel primer y segundo orden respectivamente. Para el primer modo de vibración $ga = 3.20$.

Considerando una placa metálica de aluminio de grosor $d = 0.3 \text{ mm}$ y radio $r = 10 \text{ mm}$, el primer modo de resonancia de la placa estaría en $f_0 = 7598 \text{ Hz}$, que está en el rango audible de nuestro interés. Suponiendo que una onda de esta frecuencia producirá deformaciones importantes en la placa circular de aluminio, nuestra hipótesis es que estas deformaciones se transmiten a la cerámica piezoeléctrica adherida a la placa y nos permitirán obtener una señal eléctrica. Esta hipótesis será comprobada numérica y experimentalmente en los próximos apartados.

3. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

3.1 Frecuencias de resonancia

Pese a que la expresión (1) nos permite obtener el valor de la frecuencia a la que la placa circular del encapsulado vibra en su modo fundamental, es necesaria una simulación del dispositivo para estimar el efecto de la cerámica adherida a la placa, así como para determinar el valor de la sensibilidad del sensor.

Como herramienta de simulación por elementos finitos se escoge Comsol Multiphysics con los módulos mecánico y piezoeléctrico^{vi}. Esta simulación consta de dos etapas. En la primera se realiza, a partir de las propiedades mecánicas y geométricas de los materiales involucrados en el sensor, una simulación de modos propios (Eigenfrequency)^{vii} del sistema, de forma que se puede determinar el valor de la frecuencia de resonancia de la placa circular frontal del dispositivo con la cerámica adherida (Ver Fig. 2).

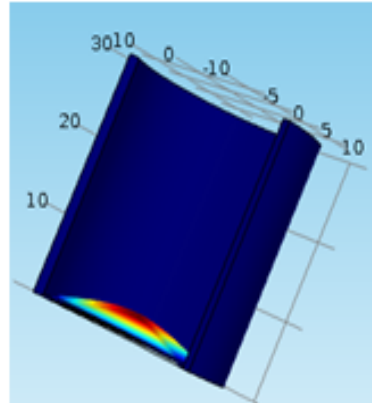


Figura 2.- Primer modo de oscilación del sensor

En la Figura 3 se pueden observar los resultados correspondientes a la frecuencia fundamental de oscilación del sensor a partir de la expresión analítica (1), expresión que no tiene en cuenta el efecto de la cerámica adherida, y a partir del resultado obtenido en la simulación FEM, en el cual sí que se ha tenido en cuenta el efecto de dicha cerámica. Se ha considerado una placa de aluminio con una densidad de 2700 kg/m³, módulo de Young de 70e9 Pa, un coeficiente de Poisson de 0.33, un espesor que varía entre 0.1 - 0.5 mm, y un radio variable entre 10.0 - 19.0 mm. La cerámica adherida sería una PI Ceramics PIC 255, de radio 10.0 mm y grosor 0.3 mm.

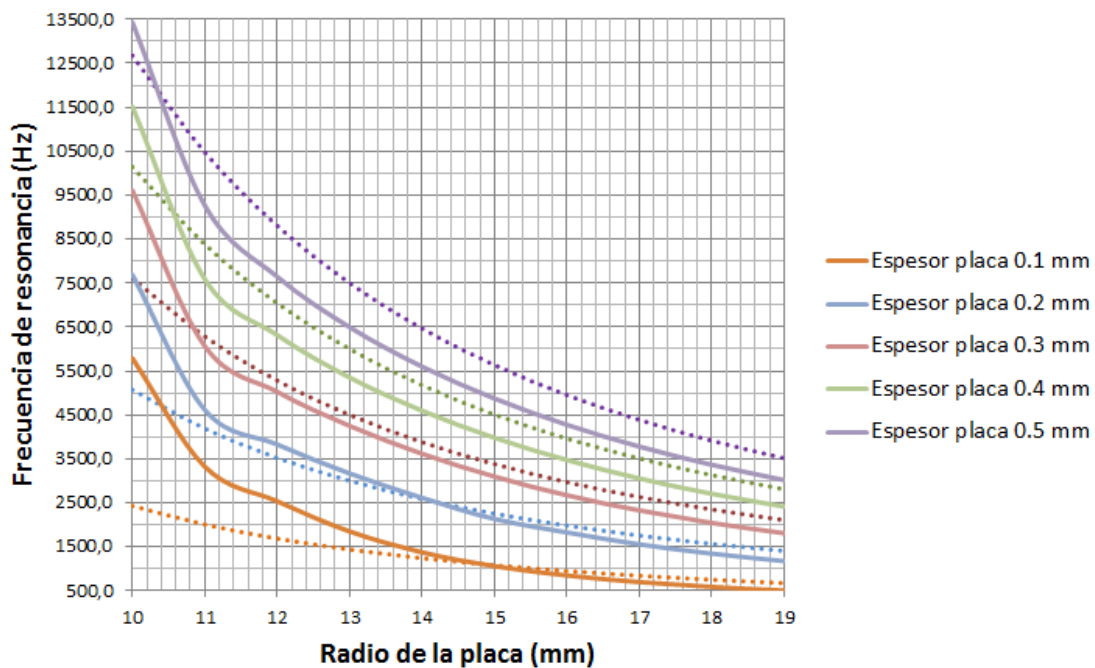


Figura 3.- Frecuencias de resonancia obtenidas por simulación de una placa circular de aluminio, con una cerámica adherida de 10 mm de radio y 0.3 mm de espesor, cuando se varía su radio y su espesor. Las líneas punteada representan los resultados obtenidos con la fórmula (1).

De la Figura 3 se observan dos comportamientos cuando se comparan los resultados obtenidos en simulación con los datos obtenidos de la expresión (1). El primer caso a destacar es cuando (radio) $a_{placa} = a_{cerámica}$, donde el sistema total comprende una sola masa de un solo espesor. Debido a esto, la frecuencia de resonancia aumenta drásticamente con respecto al modelo teórico como se puede ver en la Figura 3. Se puede observar cómo el sistema resuena conforme la placa o la cerámica aumentan su participación en su peso total. Para algunas configuraciones, la cerámica es la que más aporta masa al sistema y conforme la placa aumenta de radio y de espesor, es esta última la que comienza a tener relevancia.

La segunda zona de análisis comienza conforme el radio de la placa aumenta con respecto al radio de la cerámica, es decir $a_{placa} > a_{cerámica}$. Dentro de este supuesto, pueden distinguirse dos situaciones en cada curva: una primera donde los datos obtenidos en simulación están por encima de los obtenidos a través de la expresión (1), y una segunda donde el sistema simulado obtiene valores por debajo de los valores calculados mediante la misma fórmula. En la primer subzona, el efecto de la cerámica sigue siendo significativo debido al tamaño de la misma con respecto al de la placa metálica, con lo que la vibración corresponde al sistema compuesto, que es de mayor grosor, por lo que la frecuencia fundamental aumenta. Sin embargo, existe un determinado punto para cada grosor de placa, donde ésta tiene un tamaño lo suficientemente grande como para que el sistema se comporte como una placa que tiene cierta masa adherida, lo que resulta en una disminución de la frecuencia de resonancia del sistema (en la Figura 3 se muestra el punto de cruce para cada grosor de placa). Cabe destacar que el punto de cruce se encuentra en radios grandes cuando el grosor de la placa es menor que el de la cerámica, mientras que conforme el grosor de la placa va aumentando, incluso superando el de la cerámica, el punto de cruce sucede en radios de placa inferiores.

3.2 Sensibilidad

La segunda etapa de la simulación involucra las propiedades piezoeléctricas de la cerámica y los materiales de encapsulado (acero o aluminio)^{viii}, para que con una perturbación, en este caso una presión sobre la placa del transductor, se pueda determinar el voltaje que el mismo ofrece, y de esta forma poder ser capaces de obtener la sensibilidad.

Se contempla un modelo donde como parte de la geometría se tiene en cuenta el encapsulado, la placa frontal, la cerámica y terminales para medir una diferencia de potencial. Una deformación es producida por una condición de contorno de presión sobre la placa del encapsulado (boundary load), para calcular cuánto voltaje produce el sistema en un espectro entre 1KHz-10KHz, esto es, donde la placa del encapsulado tiene su modo natural de resonancia mecánico y donde la cerámica no tiene ningún modo de resonancia eléctrico. Esto último fue corroborado midiendo y simulando la sensibilidad de la cerámica. Un esquema de las condiciones de contorno para este problema se muestra en la Figura 4.

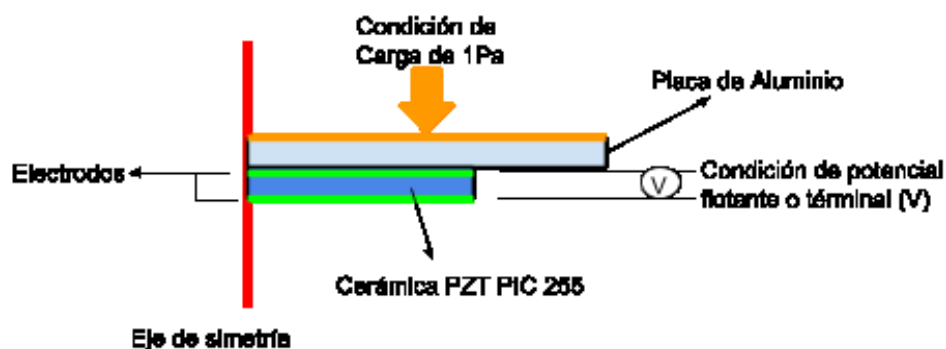


Figura 4.- Modelo simplificado de la simulación

Bajo el esquema anterior, la sensibilidad para diferentes radios de placa frontal sería la que se muestra en la Figura 5. Puede observarse cómo la sensibilidad de las colas a la izquierda de los picos aumenta cuando el diámetro de la placa de aluminio aumenta, y cómo los picos de máxima sensibilidad (resonancia) se desplazan hacia la izquierda. Así pues, si se desea optimizar la sensibilidad del sensor en frecuencias de 1 a 2 KHz, convendría utilizar radios de 1.8 a 2 cm, mientras que si se desea trabajar a frecuencias de 4 a 7 KHz, deberíamos bajar el radio de la placa frontal del sensor hasta valores de 1 a 1.2 cm.

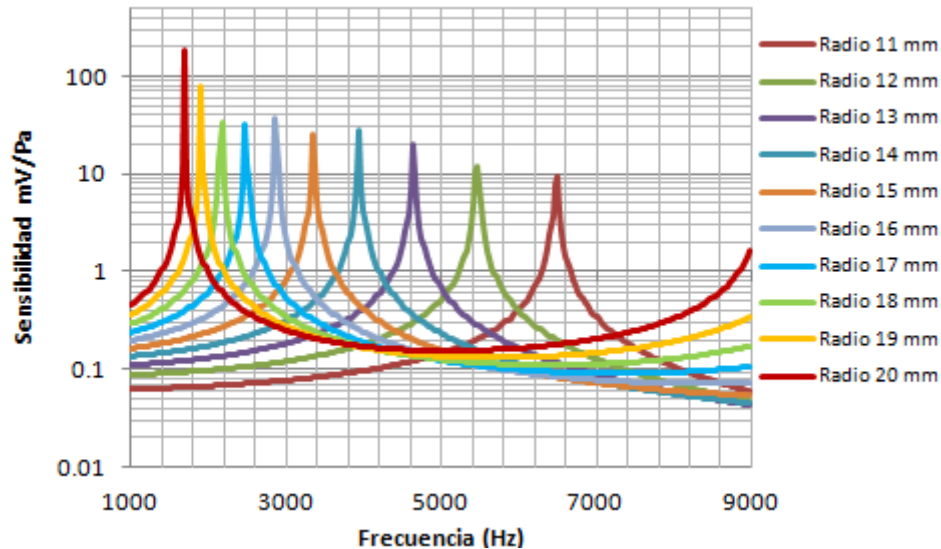


Figura 5. Simulación de la sensibilidad de diferentes diseños de hidrófonos. Espesor de cerámica constante 0.3 mm, con radio de cerámica fijo de 10 mm y radio de aluminio variable entre 10 y 20 mm, cuerpo cilíndrico de 39 mm de largo con un espesor de 1 mm

La Figura 6 muestra el efecto en la sensibilidad que se obtiene por el hecho de sustituir el material del sensor de aluminio por acero. La frecuencia de oscilación de la placa aumenta ligeramente (el acero posee un Módulo de Young mayor) y la sensibilidad decrece. Dos ejemplos para una configuración específica de sensor, placa de encapsulado de 15 mm y 17.5 mm de radio, manteniendo un espesor de 0.3 mm, y cerámica de 10 mm de radio y espesor de 0.3 mm.

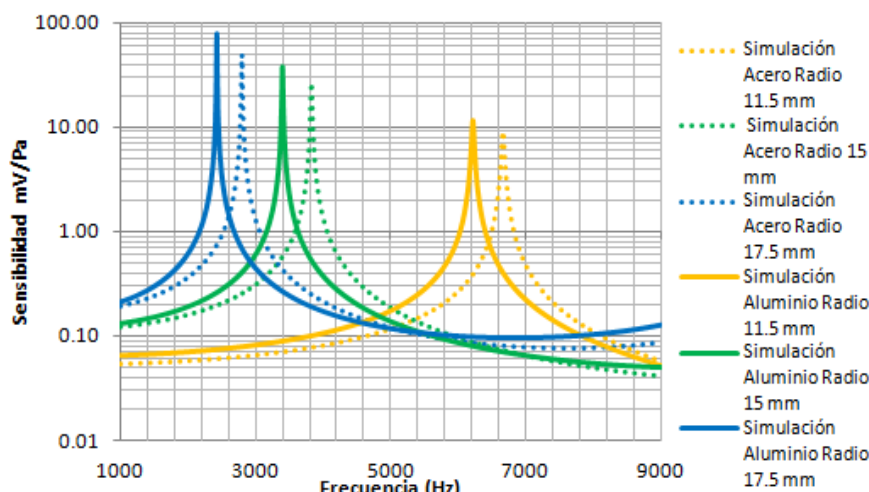


Figura 6. Comparativa de la sensibilidad obtenidas para una placa de 11.5 mm , 15 mm y 17.5mm de radio con materiales Acero o Aluminio. Cada configuración con una cerámica pegada de 0.3 mm de espesor y 10 mm de radio.

4. MEDIDAS EXPERIMENTALES DE SENSIBILIDAD

Para corroborar lo anterior, se han construido tres modelos con diferentes radios de placa con el fin de sintonizar sonidos a diferentes frecuencias de resonancia y poder contrastar su funcionamiento con los valores representados en la Figura 5. Las medidas escogidas fueron 11.5 mm, 15 mm y 17.5 mm de radio de placa. Todos los transductores tienen un espesor de placa de 0.3 mm y para cada dimensión se han fabricado un modelo en aluminio y otro en acero. Tanto la placa como el cilindro, son modelados en una sola pieza a través de CNC, siendo las dimensiones del cilindro 1 mm de espesor y 39 mm de alto.



Figura 7. Diseños construidos de encapsulados tanto en aluminio como en acero

Para la medición de sensibilidad de los transductores se utilizó la técnica descrita en UNE-EN_61094-8=2013, con el método de sinesweep y respuesta al impulso enventanada. Dicha técnica permite comparar el sistema bajo medida respecto a uno calibrado y conocido. Como fuente emisora se utilizó un altavoz preamplificado de frecuencia plana, un micrófono calibrado y una cámara anecoica.

A continuación, en la Figura 8 se muestran las curvas de respuesta en frecuencia de los hidrófonos construidos tanto en aluminio como en acero realizando una comparativa con los resultados obtenidos en simulación para los modelos construidos.

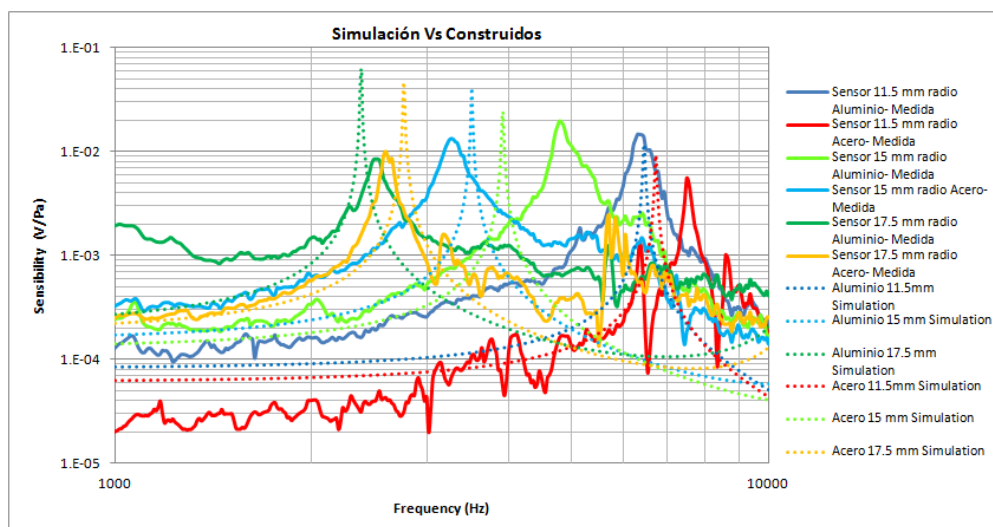


Figura 8. Gráfica de la sensibilidad y respuesta en frecuencia de los transductores construidos

Como se aprecia en la Figura 8, se puede ver como la frecuencia de máxima sensibilidad varía con respecto a los diámetros de los encapsulados. También con los pocos modelos

construidos, se puede apreciar ligeramente la influencia de cada material en dichos picos. Algunos valores se alejaron de los valores esperados, pero esto es debido al proceso de manufactura, donde la cantidad de epoxi a la hora de pegar la cerámica al encapsulado y los puntos de soldadura que unen los cables a los electrodos, no pueden ser variables controladas y por lo tanto tienen una repercusión importante en los resultados y que como lo demuestra la *Figura 3*. Cualquier variación en el espesor dentro de una tolerancia de 0.1mm, cambia la respuesta de trabajo del sensor. En cuanto al nivel de sensibilidad, a través de métodos de elemento finitos, con simulación puede hacerse una buena estimación de los niveles que se esperarían al construir los modelos, para de esta forma tener caracterizado el sistema antes de construirlo, pero esto dependerá de una buena caracterización de la cerámica en sus especificaciones técnicas y en sus coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas.

5. CONCLUSIONES

A través de este trabajo se describe una metodología para diseñar transductores piezoeléctricos encapsulados para realizar estudios acústicos en ambientes donde micrófonos convencionales no podrían trabajar, ya sea por sus características mecánicas o electromagnéticas. La teoría de vibración en placas ha sido empleada, demostrando que una cerámica piezoeléctrica adherida a una placa metálica de menor espesor, entregue una diferencia de potencial producto de la deformación mecánica del modo fundamental de resonancia de la placa.

La Ecuación 1 se acerca bastante a la hora de realizar una primera aproximación al diseño de este tipo de sensores. Sin embargo, esta forma no da resultados exactos, ya que además de la placa metálica, el sistema está conformado por una cerámica piezoeléctrica adherida, lo que puede modificar drásticamente la frecuencia fundamental de resonancia del sistema y de allí a que sea necesaria una implementación por elementos finitos.

También fue posible obtener una aproximación de la sensibilidad esperada del sistema contemplando los modelos y constantes piezoeléctricas haciendo uso de módulo Piezoeléctrico de Comsol Multiphysics. Pero sus parámetros de entrada a la hora de introducir los coeficientes de pérdidas mecánicas y eléctricas, deben ser empíricamente ajustados, de lo contrario se pueden presentar inconsistencias en la amplitud en un orden de magnitud de 10.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- ⁱ Ortega, Basilio Pueo, and Miguel Romá Romero. *Electroacústica: altavoces y micrófonos*. Pearson Educación, SA, 2003.
- ⁱⁱ Eargle, John. *The microphone book*. Taylor & Francis, 2004.
- ⁱⁱⁱ Bakhoun, Ezzat G, and Marvin HM Cheng. "Advanced optical microphone." *Sensors Journal, IEEE* 14.1 (2014): 7-14.
- ^{iv} Loeppert, Peter V, and Sung B Lee. "SiSonic™—The first commercialized MEMS microphone." *Proceedings of the Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop* 4 Jun. 2006: 27-30.
- ^v Kinsler, Lawrence E et al. "Fundamentals of acoustics." *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition*, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999. 1 (1999).
- ^{vi} "Piezoelectric Simulations with COMSOL Multiphysics." 2013. 7 Jun. 2015
<<http://www.comsol.com/video/piezoelectricsimulations-comsol-multiphysics>>
- ^{vii} Humar, J. *Dynamics of structures*. CRC Press, 2012.
- ^{viii} Lerch, Reinhard. "Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements." *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on* 37.3 (1990): 233-247.