

MÉTODO DE DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES ACÚSTICOS APLICADOS A LA TECNOLOGÍA SUBACÚATICA

González Zamora, C.¹, González Hurtado, A.², Calderón Álvarez, A.F.³

^{1, 2, 3}, Centro de Investigación y Desarrollo Naval

¹e-mail: cid5@reduim.cu

RESUMEN

El trabajo describe las experiencias en el diseño y la caracterización de sensores acústicos que emplean cerámicas piezoeléctricas como elemento sensible y un soporte mecánico de acuerdo a las funciones que realizan. Se muestra el método empleado para lograr el cálculo teórico, obtención del modelo aproximado y la simulación de su respuesta por método de elementos finitos. Finalmente se realiza la caracterización eléctrica con análisis Bode y la caracterización acústica en el aire y en el agua en tanque de experimentación, observándose la correspondencia de los resultados teóricos con los resultados reales obtenidos después de construido. Este trabajo posee gran novedad y aplicación en los sistemas acústicos de aplicación en tecnología submarina.

Palabras claves: Métodos de diseño, sensores acústicos, tecnología submarina.

SUMMARY

The job describes the experiences in the design and the characterization of acoustic sensors that they use piezoelectric ceramics like sore element and they use a mechanical support according to the shows that realize. The employed procedure to achieve the theoretic calculation, obtaining of the approximate model and the simulation of his answer for finite-element method is shown. Finally accomplishes him the electric characterization with analysis Bode and the acoustic characterization on the air and in the water in tank of experimentation, observing the correspondence of the theoretic results with the real results gotten after out of constructed. This work has great new thing and application at the acoustic systems of application in submarine technology.

Key words: Designing methods, acoustic sensors, submarine technology.

1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad el ímpetu de la actividad naval en casi todas las esferas de la ciencia, la economía y la defensa han permitido un vertiginoso desarrollo de la tecnología en función de dar solución a las disímiles tareas planteadas.

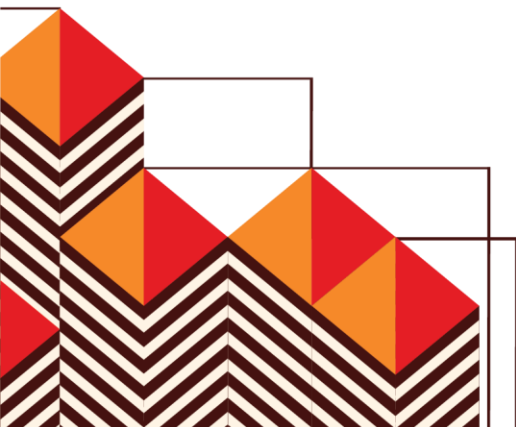
Un lugar primordial se ha dedicado al empleo de una amplia variedad de sensores y transductores implementados en diferentes equipos como ecosondas, sonares, medios de comunicaciones submarinas y de posicionamiento, etc., los cuales basan su funcionamiento en los principios de la propagación de las ondas sonoras en el mar para la obtención de la información necesaria para el cumplimiento de sus tareas.

Los sensores acústicos independientes o dispuestos en arreglo de antenas constituyen la interfase entre el medio circundante donde se propaga la energía acústica y los dispositivos necesarios para la recepción o transmisión de la información. Es apreciable que en todos los países productores de tecnología subacuática se emplean sensores acústicos que en su mayoría basan su funcionamiento en los principios físicos piezoeléctrico o magnetoestrictivo [1, 2, 4].

Los sensores acústicos piezoeléctricos han sido los de mayor empleo por su versatilidad y de forma general representan un sistema oscilante destinado para la emisión, recepción o ambas, de señales acústicas en el medio acuoso.

En lo adelante se realiza la descripción del método para los sensores acústicos receptores, piezoeléctricos con estructura del sistema oscilante de láminas flexibles.

Contar con las herramientas teóricas, la instrumentación y plataformas experimentales nos permite lograr una independencia tecnológica y poder satisfacer las exigencias de diseño y caracterización de sensores acústicos producidos en el país, principal aporte del método propuesto del cual se exponen a continuación la secuencia de las diferentes etapas de su desarrollo así como los procedimientos descriptivos de su contenido.



2- MATERIALES Y MÉTODOS

Método para el diseño y evaluación de sensores acústicos flexibles piezoeléctricos

El desarrollo del método para el diseño y evaluación de sensores acústicos, parte de una etapa teórica donde se calculan sus dimensiones y diseñan sus partes componentes por método analítico para lograr el diseño teórico y a partir de este desarrollar la simulación de su funcionamiento por el método de elementos finitos. Posteriormente se desarrolla la etapa experimental que incluye los procedimientos, las técnicas e instrumentos para la fabricación del sensor y el desarrollo de ensayos de laboratorio para la caracterización de sus parámetros técnicos. Ver figura 1.

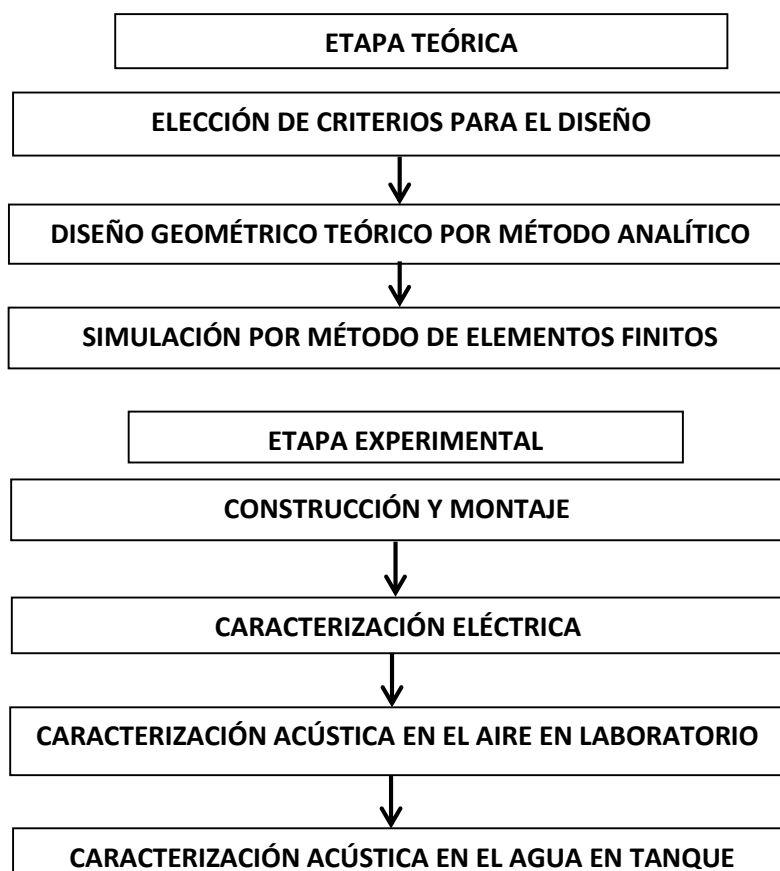


Figura 1. Etapas generales del método.

En la etapa teórica del método el objetivo fundamental es obtener el diseño de las partes componentes del sensor a partir de los criterios escogidos como datos iniciales y exigencias a cumplir en el diseño, empleando para ello el método analítico inicialmente y posteriormente el método numérico de elementos finitos.

La etapa experimental tiene como objetivo central evaluar el funcionamiento del sensor a través de pruebas a diferentes niveles. Esta etapa parte de la fabricación del sensor, de la cual depende en gran medida, la calidad de los resultados de los ensayos de caracterización tanto en el aire como en el agua a nivel de laboratorio.

Determinación de los criterios para el diseño

A primera instancia es necesario precisar el destino para el cual será desarrollado el sensor y como parámetro definitorio en qué frecuencias de trabajo debe responder adecuadamente y en qué límites o zonas debe reaccionar. Por ello definimos los siguientes criterios:

1. El sensor tiene la misión de detectar las emisiones del campo acústico de los buques que tiene un espectro predominante en el rango de frecuencias de 800 Hz hasta 30 kHz por lo que pudiera emplearse un sensor de tipo flexible que emplee una cerámica piezoeléctrica como elemento activo soportado en una fina membrana elástica circular empotrada rígidamente en todo su contorno.
2. Se determina la frecuencia de trabajo f_t con su respectivo ancho de banda en el rango de frecuencias dentro del espectro del campo acústico de los buques.
3. Se asume el ancho del diagrama direccional tanto en el plano vertical como en el plano horizontal entre los límites que permitan garantizar la recepción con determinada direccionalidad.

Obtención del diseño geométrico teórico por método analítico.

En este paso se realiza la aproximación a las dimensiones reales que debe tener el sensor y de qué materiales se precisan para que el mismo cumpla con las exigencias de los criterios iniciales. Para ello debe realizarse una amplia búsqueda bibliográfica que permita obtener las ecuaciones que



fundamenten los cálculos teóricos y llegar a un modelo que satisfaga el diseño del sensor y se calculan las dimensiones preliminares partiendo de las exigencias conocidas:

- a) Se calcula el diámetro D de la membrana soporte para garantizar el ancho del diagrama direccional exigido y considerando la frecuencia de trabajo escogida.

Conociendo que para el caso de un sensor circular el ancho del diagrama direccional se calcula [4,7]:

$$\alpha = \frac{65 \cdot \lambda}{D} \quad (1)$$

Donde:

λ - longitud de onda de la frecuencia de trabajo del sensor, metros.

α - ancho del diagrama direccional del sensor, grados.

Teniendo en cuenta que:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Asumiendo que para los cálculos la velocidad del sonido en el mar $c = 1500$ m/s, entonces se podrá calcular el valor del diámetro de la membrana.

- b) Se calcula el espesor h de la membrana conociendo el diámetro y asumiendo como material el Aluminio con las siguientes propiedades:

Módulo de elasticidad $E = 7 \times 10^{10}$ Pa.

Densidad $\rho = 2700$ Kg/m³

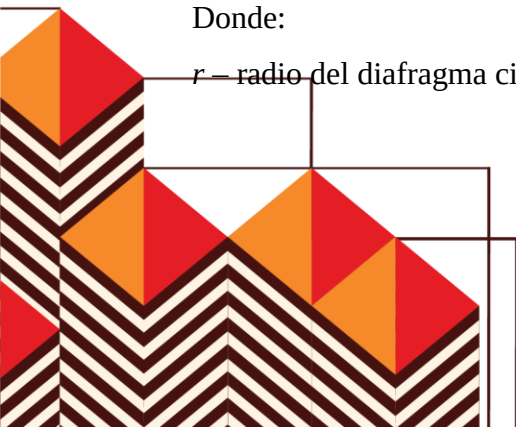
Coeficiente de Poisson $\sigma = 0,33$

Conociendo que para un diafragma circular empotrado en su contorno la frecuencia natural se calcula [5]:

$$fn = \frac{0.474}{r^2} \sqrt{\frac{E \cdot h^2}{\rho (1 - \sigma^2)}} \quad (3)$$

Donde:

r - radio del diafragma circular, metros.



Despejando de la ecuación anterior y considerando las propiedades del material obtenemos el valor de la frecuencia natural. Una forma práctica de obtener valores aproximados se obtiene a partir de asumir diferentes valores de espesor entre el rango de 1 a 3,5 mm.

En aras de acercarnos al modelo aproximado y conociendo que la frecuencia natural de un simple disco redondo conformado de una pieza única que opera en un modo de flexión simétricamente axial se puede expresar como [4, 8]:

$$f_r = C_n \cdot h / D^2 \quad (4)$$

Donde:

h – espesor del disco, metros.

D – diámetro del disco, metros.

C_n - constante cuyo valor depende del método de montaje y de la velocidad del sonido en el material, Hertz x metros.

Para cálculos aproximados el valor de C_n puede asumirse como [8]:

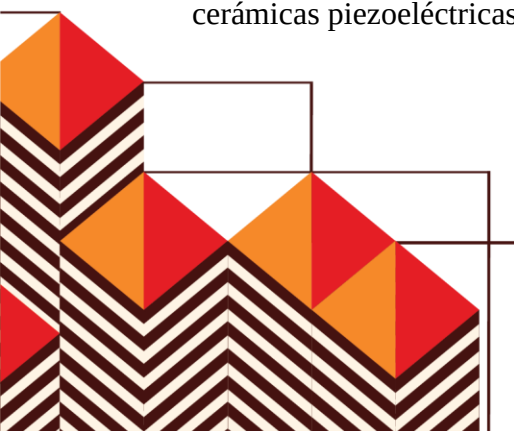
$C_0 \approx 1 \times 10^4$ Hz.m (resonancia fundamental)

$C_1 \approx 4 \times 10^4$ Hz.m (primer armónico)

Calculamos el valor de la frecuencia de resonancia. Este cálculo debe tener un valor correspondiente al valor de la frecuencia natural para el caso de sensores flexibles soportados en lámina circular [8].

c) Elección del material activo

Existen diferentes tipos de cerámicas piezoeléctricas y en la actualidad las más difundidas son de la familia PZT (Zirconato Titanato de Plomo) las cuales se diferencian en sus propiedades dieléctricas y piezoeléctricas. En general para usos en transductores donde se potencia la emisión, se emplean cerámicas duras (PZT-4, PZT-8), y en donde la recepción es el régimen fundamental se emplean cerámicas blandas (PZT-5A, PZT-5H) [2, 7]. En nuestro caso emplearemos discos de cerámicas piezoeléctricas tipo PZT-5A con un diámetro $d=18$ mm y espesor $h=0,5$ mm.



d) Obtención del modelo geométrico.

Cumpliendo con las condiciones de [2,8]:

a) $d \leq 0,35 D$ entonces $C_0 = 10^4 \text{ KHz.m}$

b) $d \leq 0,25 D$ entonces $C_1 = 4 \times 10^4 \text{ KHz.m}$

Podemos asumir para el modelo geométrico teórico según figura 2, de una membrana circular empotrada en su contorno con disco de cerámica piezoeléctrica en el centro de su eje axial, la cual realizará oscilaciones con frecuencia natural:

$$f_n = C_n \frac{h}{D^2} \quad (5)$$

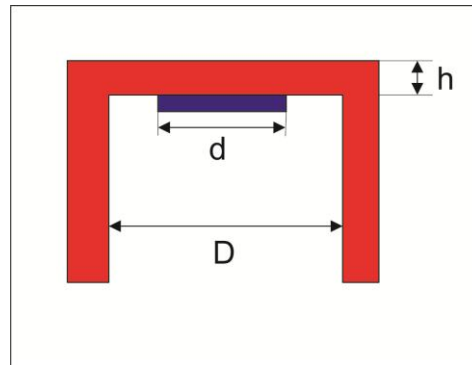


Figura. 2. Grafico del modelo geométrico del sensor con membrana circular.

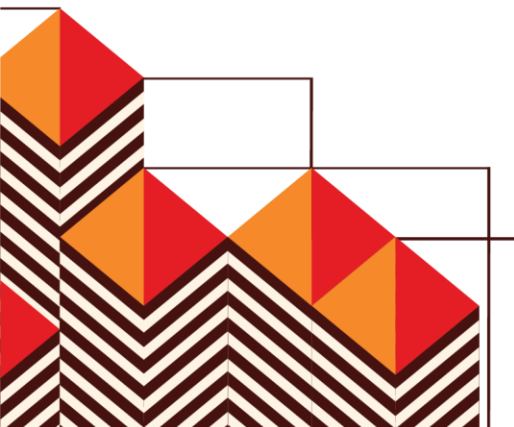
Simulación con elementos finitos

- Análisis Modal

Las frecuencias a las cuales las vibraciones ocurren de manera natural y las formas (deformadas) que toma el sistema físico cuando oscila a estas frecuencias se determinan a través del análisis modal [3, 6].

Para el cálculo se emplea la ecuación del movimiento, sin considerar el amortiguamiento del sistema:

$$[M] \times [\ddot{U}] + [K] \times \{u\} = \{0\} \quad (6)$$



Donde:

[M]: masa del sistema.

[$\ddot{U}$]: vector aceleración.

[K]: matriz de rigidez.

{u}: desplazamientos (deformaciones)

Se pueden obtener las frecuencias naturales para los diferentes modos de vibración según se muestra en la tabla 1 y ejemplo ilustrativo del análisis en la figura 3:

Tabla 1. Modos de vibración con la frecuencia asociada

Modo	Frecuencia	Modo	Frecuencia
1	2084.6	11	13924
2	4319.8	12	13925
3	4320.7	13	16843
4	7052.4	14	16845
5	7053.3	15	17726
6	8033.5	16	18015
7	10262	17	18016
8	10263	18	21932
9	12203	19	21934
10	12205	20	22512

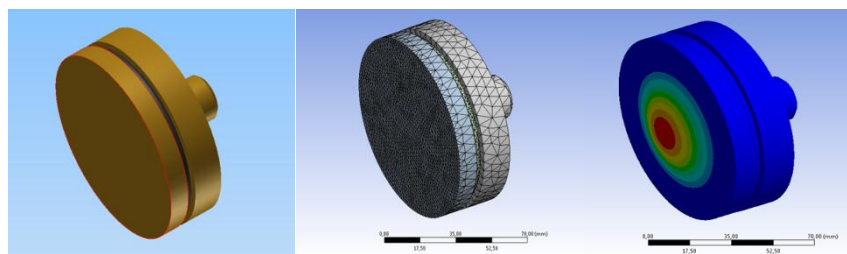


Figura 3. Fases para el desarrollo del análisis modal

- Análisis Armónico.

De manera similar, para este análisis se emplea la ecuación del movimiento, pero considerando una excitación armónica, la cual producirá también una respuesta cíclica a una frecuencia conocida como muestra la figura 4:

$$[M] \times [\ddot{u}] + [K] \times \{u\} = \{Fa\} \quad (7)$$

$\{Fa\}$: carga armónica aplicada al sistema:

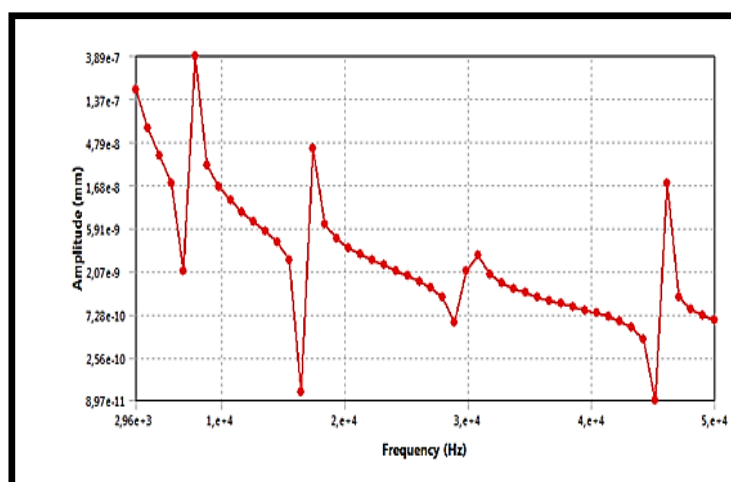


Figura 4. Ejemplo ilustrativo de un análisis armónico

3- RESULTADOS

Construcción y montaje

El sensor acústico desarrollado está compuesto por un cuerpo metálico de aluminio de dos secciones. La primera sección compuesta por el cuerpo y la segunda por la tapa donde se destaca el diafragma. En la tapa-diafragma se pega la cerámica piezoeléctrica de tipo PZT-5A la cual esta provista de dos electrodos de una capa fina de plata a los cuales se le sueldan los cables.

Como resultado de la acción de la presión provocada por las oscilaciones del campo acústico de los buques sobre el diafragma ello provoca que el elemento piezoeléctrico varíe su diámetro y espesor. En la figura 5 se muestran las etapas de montaje del sensor.





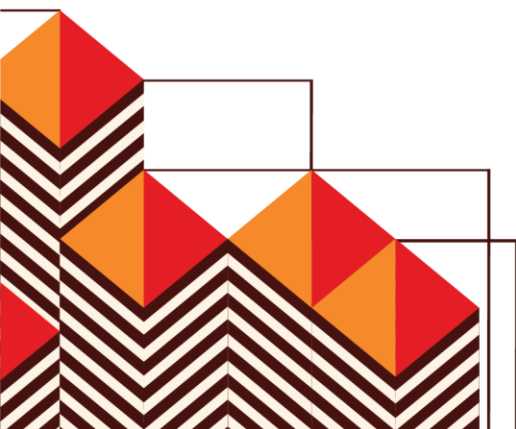
Figura 5. Etapas del montaje y ensamble del sensor acústico flexible piezoeléctrico.

Dado que el elemento piezoeléctrico está rígidamente pegado al disco metálico, las alteraciones en su diámetro provocan la aparición de una tensión eléctrica alterna en los terminales, las deflexiones se repetirán periódicamente siguiendo la frecuencia de las oscilaciones del campo acústico del buque. En la frecuencia de resonancia mecánica del sensor la amplitud de las deflexiones alcanzará el máximo y así será también el valor de la amplitud de la tensión de salida.

Durante el montaje es de suma importancia tener en cuenta el adhesivo que se emplea para pegar la cerámica piezoeléctrica, el cual debe garantizar una fijación correcta y debe ser uniforme. Se aconseja emplear pegamentos con aditivos de plata. Otra cuestión importante es lograr una tierra adecuada para evitar ruidos en la respuesta del transductor. Al concluir el ensamble deben realizarse pruebas de hermeticidad que garanticen el trabajo del transductor sumergido a las profundidades donde será empleado.

Caracterización eléctrica

Una de las formas de comprobación de la calidad de la construcción del sensor es sometiéndolo a una caracterización de su respuesta eléctrica y verificando los valores de impedancia que asume ante la excitación con un barrido de frecuencias [4, 7].



Para ello puede emplearse un analizador de redes o medidor de impedancias y realizar esta tarea que permite además determinar la frecuencia de resonancia donde menor impedancia se manifieste y la frecuencia de antiresonancia donde este valor sea máximo.

Un ejemplo del análisis y la respuesta del transductor se muestran en la en la figura 6.

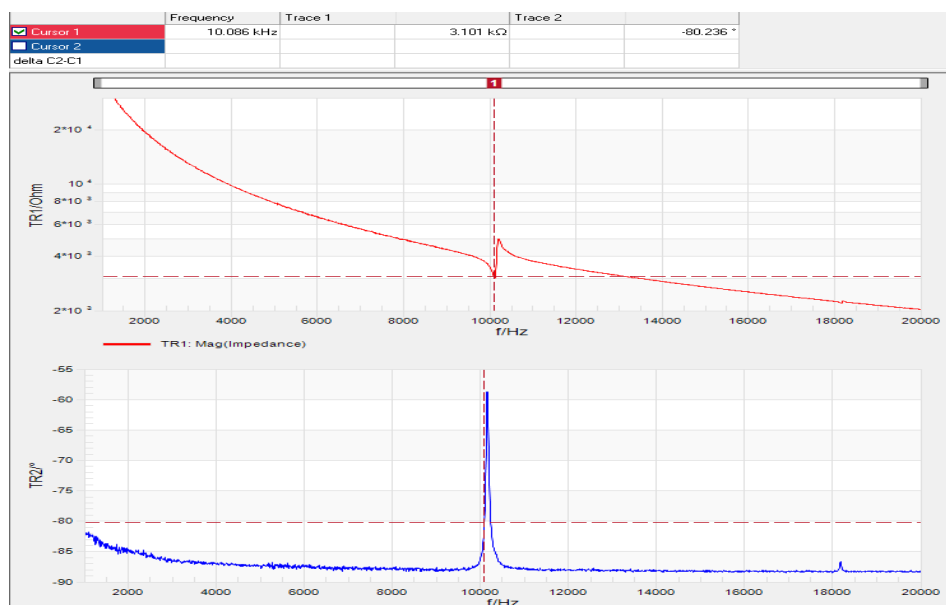
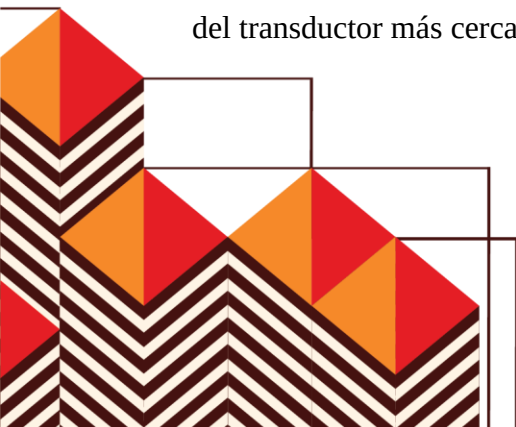


Figura 6. Respuesta del transductor a la caracterización eléctrica

Caracterización acústica

Como paso determinante para evaluar los parámetros técnicos y de empleo del transductor es imprescindible realizar su caracterización acústica, la cual inicialmente debe realizarse en el aire y posteriormente en el agua.

Para el desarrollo de estas pruebas se requiere de equipamiento especial calibrado y estanques o piscinas y al final se obtendrán parámetros característicos del transductor como son su sensibilidad, direccionalidad y respuesta de frecuencias que permitirán conocer el desempeño del transductor más cercano a su explotación en condiciones reales.



La caracterización acústica en el aire permite [4,7]:

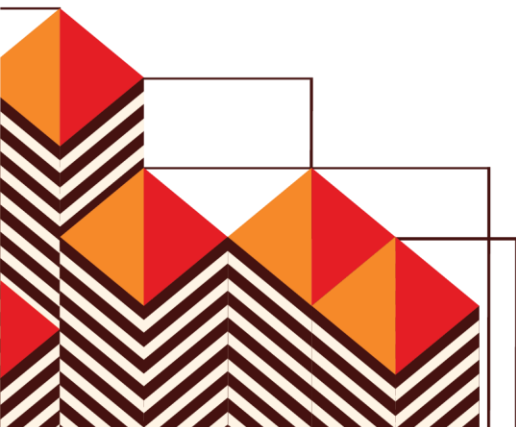
- Comprobación de los niveles de tensión de salida del sensor en circuito abierto a diferentes frecuencias.
- Respuesta de frecuencias con determinación de resonancias significativas.
- Límites mínimos de excitación con presión acústica con respuesta coherente.

La caracterización acústica en el agua permite la determinación de [4, 7, 8]:

- Respuesta de Sensibilidad en recepción
- Característica en direccionalidad del sensor
- Índice de directividad
- Ancho del diagrama direccional en ambos planos
- Ancho de banda efectivo en circuito abierto.

Para la caracterización acústica en el agua, se emplea un tanque de experimentación y como instrumentos de medición calibrados los transductores patrones TC- 4034 como emisor patrón y TC- 4013 como receptor patrón.

El tanque de experimentación acústica subacuático es de plástico reforzado con cuadernas, con un volumen de 0,54 m³ (125x83x52 cm). En su interior se colocó una estructura rectangular de laminado de fibra de vidrio forrada con planchas de neopreno de espesor 10 mm con el objetivo de apantallamiento acústico, quedando con las dimensiones interiores de 1,22 m de largo, 0,77 m de ancho y 0,46 m de profundidad para un volumen efectivo de 0,43 m³. Además se instalaron dispositivos de sujeción para los transductores patrones y para las muestras. En las figuras 7 y 8 se muestran el croquis con las dimensiones e imágenes del tanque de experimentación con los dispositivos de sujeción.



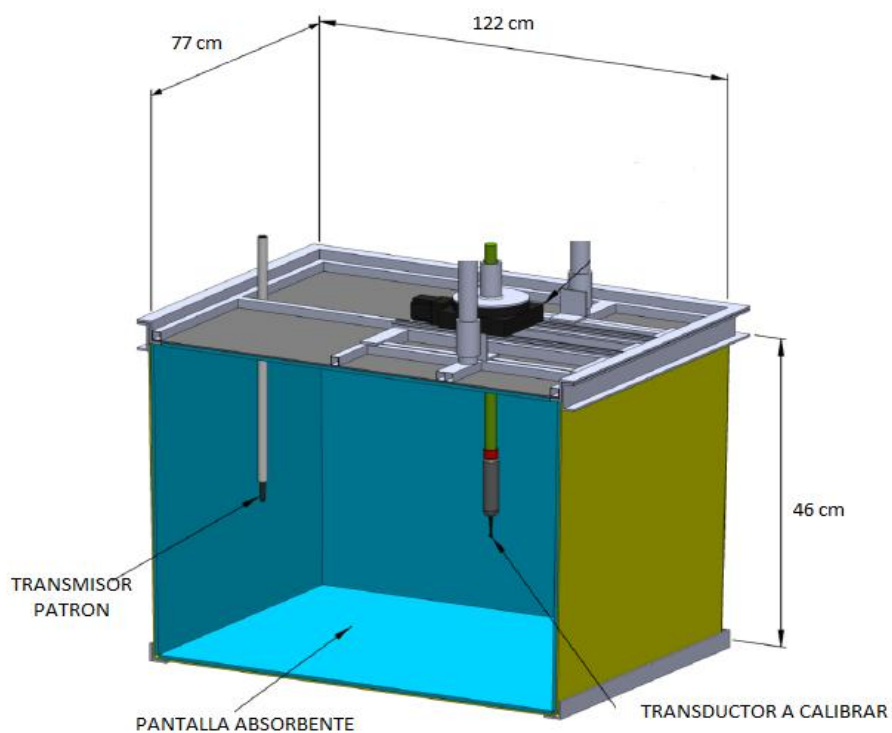


Figura 7. Dimensiones geométricas del tanque de experimentación.



Figura 8. Tanque de experimentación con dispositivos de sujeción de los sensores.



Un ejemplo de la característica direccional de un sensor piezoeléctrico circular, obtenida de la caracterización acústica en el agua en tanque de experimentación, se muestra en la figura 9.

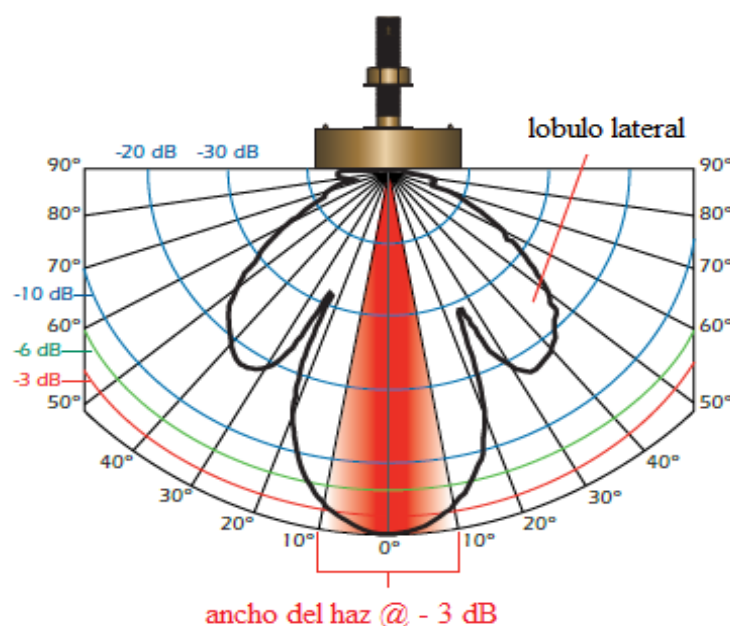


Figura 9. Característica direccional de un sensor piezoeléctrico circular

4- DISCUSIÓN

Con el desarrollo del método en cada una de las etapas, se obtienen los resultados que permiten llegar a un diseño teórico que permite definir la geometría del sensor, los materiales componentes con sus características físicas y mecánicas, así como realizar un ensamble teórico para realizar la simulación con la herramienta de los elementos finitos y poder predecir el comportamiento del mismo ante diferentes cargas y con ello asumir soluciones finales antes de su construcción y montaje práctico. Durante la etapa experimental se validan los datos característicos que se esperan del sensor obtenido, logrando la cuantificación medida de los principales parámetros que describen las cualidades para lo cual fue concebido el mismo. El método propuesto nos permite lograr un producto final con alta eficiencia y rigor científico.

5- CONCLUSIONES

1. Como parte componente de los sistemas de tecnología subacuática a bordo de las plataformas navales, los sensores acústicos flexibles piezoeléctricos han sido empleados satisfactoriamente en los rangos de frecuencia de 800 Hz a 30 KHz.
2. El método expuesto para el diseño de sensores acústicos piezoeléctricos soportados en láminas flexibles permitió cumplir satisfactoriamente las etapas de diseño y evaluación de este tipo de sensores.
3. Los procedimientos, técnicas e instrumentos descritos en el método de diseño y caracterización de sensores acústicos, constituyen una plataforma flexible para cumplir las tareas de diseño, simulación, fabricación y caracterización de los parámetros de sensores acústicos que se produzcan en el país.

6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Urick, R.J. "Principles of Underwater Sound", McGraw – Hill, New York, 1983.
2. Berlincourt, D.A. "Piezoelectric and Piezomagnetic materials and their function in transducers", Physical Acoustic, Vol 1, 1986
3. Jaehwan, K. y Heung, S.: "Finite element analysis of piezoelectric underwater transducers for acoustic characteristics", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 23, 452 – 460, 2012.
4. Butler, J.L. y Sherman, C.H. "Transducers and arrays for underwater sound", Second Edition, Acoustical Society of America – Springer, New York, 2016.
5. Arguelles, J.A. "Mediciones de eventos mecánicos dinámicos", Editorial Pueblo y Educación, 226 – 230, 1987.
6. "ANSYS Theory Manual", Ansys Release 9.0, Noviembre, 2004.
7. Feeney, A., Kang, L. y Dixon, S.: "The dynamic performance of flexural ultrasonic transducers", Sensors, Vol 18, 270, 2018.
8. Randeraat, J.V. "Piezoelectric Ceramics", Philips Application, 2017

