

CALIBRACIÓN DE UN PROYECTOR SUBMARINO EFICIENTE EN BAJAS FRECUENCIAS

PACS: 43.30.+m, 43.30.Yj

Álvaro Lloret Gaona¹, Víctor Espinosa Roselló¹, Jaime Ramis Soriano², Isabel Pérez Arjona¹, Pedro Poveda Martínez², Manuel Bou Cabo³

1. Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres Universidad Politécnica de Valencia. C/ Paranimf, 1 46730 Grau de Gandía, España.
2. Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías. Universidad de Alicante Campus de San Vicente del Raspeig, España.
3. Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Murcia Varadero nº 1 Aptdo. 22 30740 San Pedro del Pinatar (Murcia), España.

Palabras Clave: Proyector submarino, calibración, simulación, radiación acústica.

ABSTRACT. The following article has as its main objective the calibration of an underwater transducer designed to be efficient at low frequencies (50-100Hz). In the calibration process, not only the characteristics of the emitted field will be taken into account, but also the particle displacement through different types of sensors (hydrophone arrays and accelerometer). The displacement generated by the transducer diaphragm transmits a disturbance to the particles of the medium with which it is in contact, thus causing an energy radiation. The acoustic power radiated in a medium depends directly on the diaphragm displacement and in turn, this displacement depends on the tension given to the transducer. Using a sensor placed in the diaphragm in order to know its displacement, a relationship between the given tension and the radiated acoustic power to the medium can be established.

RESUMEN.

La presente propuesta tiene como objetivo principal la calibración de un proyector submarino diseñado para ser eficiente a bajas frecuencias (50-1000Hz). En la calibración se tendrán en cuenta no solo las características de presión del campo emitido, sino también el desplazamiento de partículas mediante distintos tipos de sensores (arrays de hidrófonos y acelerómetro). El desplazamiento generado por la membrana de un transductor transmite una perturbación a las partículas del medio con el que está en contacto ocasionando así una radiación de energía. La potencia acústica radiada en un medio depende directamente del desplazamiento de la membrana y a su vez este desplazamiento depende de la tensión que se entrega al transductor. Mediante un sensor colocado en la membrana para conocer el desplazamiento de ésta se puede establecer una relación entre la tensión entregada y la potencia acústica radiada al medio.

1. INTRODUCCIÓN

La calibración de transductores acústicos es un proceso habitual en la industria acústica. La calibración permite conocer la sensibilidad (potencia acústica radiada en función de la frecuencia y el voltaje entregado) del transductor. Es importante que los transductores estén calibrados correctamente para añadir fiabilidad a la hora de su aplicación. Esta comunicación es un punto de partida para profundizar en la calibración realizando simulaciones en elementos finitos y tomando como referencia el modelo no lineal en representación circuital.

Según el ámbito de aplicación del transductor se busca un valor de sensibilidad diferente y un rango frecuencial de trabajo. El transductor utilizado en esta comunicación se trata de un proyector eficiente en bajas frecuencias (50-1000 Hz). Este proyector ha sido diseñado en colaboración de la Universidad de Alicante y la empresa Beyma. El proyector se ha utilizado previamente como elemento para calibrar hidrófonos de bajo coste [1].

Durante dicho experimento se sumergió en el agua el proyector con una carcasa para la estanqueidad de la electrónica. Aun así, el agua pudo entrar y afectó al funcionamiento. Actualmente el proyector ha sido reparado y se está diseñando una nueva carcasa que asegure una mejor estanqueidad.

La radiación acústica de cualquier transductor depende de una serie de parámetros mecánicos y eléctricos, que pueden consultarse en la bibliografía [2]. En el caso de un pistón radiando de forma libre los parámetros que lo caracterizan se pueden definir como un circuito mecánico con el siguiente modelo.

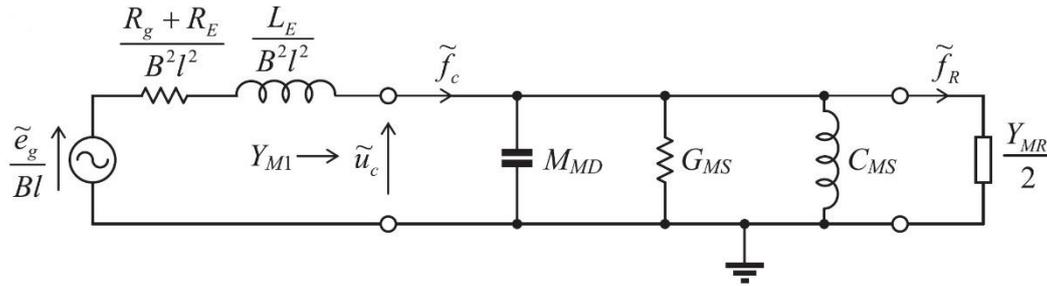


Figura 1. Circuito mecánico equivalente de un altavoz electrodinámico [2].

Donde \tilde{e}_g es el generador de voltaje en voltios (V), Bl es el factor de transformación en Tesla por metro (T/m), R_g es la resistencia interna del generador en ohms (Ω), R_e es la resistencia eléctrica en ohms (Ω), L_e es la inductancia en Henrios (H), M_{MD} es la masa mecánica del diafragma en kilogramos (kg), G_{MS} es la conductancia mecánica de la suspensión, la inversa de R_{ms} , en $m \cdot N^{-1} s^{-1}$, C_{MS} es la compliancia mecánica de la suspensión en m/N , Y_{MR} es la admitancia mecánica de radiación en $m \cdot N^{-1} s^{-1}$. u_c es la velocidad de la membrana (m/s).

La impedancia eléctrica del circuito mecánico presentado con anterioridad se define por la ecuación (1).

$$Z_e(\omega) = R_e + j\omega L_e + \left(j\omega \frac{M_{MS}}{B^2 l^2} + \frac{1}{B^2 l^2 G_{MS}} + \frac{1}{j\omega B^2 l^2 C_{MS}} \right)^{-1} [\Omega] \quad (1)$$

Siendo la M_{MS} la masa mecánica de suspensión definida por el conjunto de la masa mecánica de radiación y la masa del diafragma:

$$M_{MS} = M_{MD} + 2M_{M1} = M_{MD} + 2(2.67a^3 \rho) [\text{Kg}] \quad (2)$$

Donde a es el radio en metros del diafragma y ρ es la densidad del medio.

Desde el punto de vista mecánico la impedancia mecánica total se suele expresar mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{MT} = \left(\frac{B^2 l^2}{R_e + j\omega L_e} \right) + j\omega M_{MS} + R_{MS} + \frac{1}{j\omega C_{MS}} + Z_{MR} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right] \quad (3)$$

En el caso de radiación en pantalla infinita el circuito la impedancia de radiación se expresa como:

$$Z_{MR} = R_{MR} + X_{MR} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right] \quad (4)$$

Por otro lado, la ecuación de impedancia mecánica total se ve modificada al encerrar el proyector dentro de una caja, esto es debido a que el aire encerrado en el volumen de la caja

actúa como un muelle. Los parámetros directamente afectados son la M_{MS} y la C_{MS} . La masa mecánica de radiación M_{MR} se divide en la masa asociada a la cara externa de la caja (M_{MR1}) y a la cara interna (M_{MR2}). En cuanto a la C_{MS} , esta se ve modificada por la C_{MB} que depende del volumen de la caja.

$$M'_{MS} = M_{MD} + M_{MR} = M_{MD} + M_{MR1} + M_{MR2} \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

$$C'_{MS} = \frac{C_{MS} C_{MB}}{C_{MS} + C_{MB}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right] \quad (6)$$

En los casos de pistón radiando en pantalla infinita y radiando en la caja la potencia acústica radiada se expresa de la misma forma en ambos casos.

$$W = \left| \frac{u_c}{\sqrt{2}} \right|^2 R_{MR} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

Las variables u_c y R_{MR} según la bibliografía se definen como:

$$|u_c| = \frac{e_g B^2 I^2}{(\text{Re} + j\omega L_e) Z_{MT}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (8)$$

$$R_{MR} = \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) c \pi a^2 \quad \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right] \quad (9)$$

Siendo k el número de onda y a el radio del proyector.

El presente trabajo resume los esfuerzos realizados para obtener los parámetros mecánicos y el desplazamiento del diafragma del proyector radiando en aire para hacer un ajuste en las ecuaciones teóricas y posteriormente hacer así una simulación de radiación en un medio distinto (agua).

2. METODOLOGÍA

En primer lugar, para la obtención de los parámetros mecánicos del proyector se realizaron dos mediciones experimentales de la impedancia eléctrica con el software CLIO. La primera medición se hizo con el proyector radiando de forma libre y la segunda medida se realizó con el proyector radiando dentro de una caja con un volumen de 30 cm^3 . Como se puede observar en la figura 2, al radiar sobre un volumen cerrado la frecuencia de resonancia se ha incrementado y los valores de impedancia han aumentado entorno a la zona de frecuencia de resonancia.

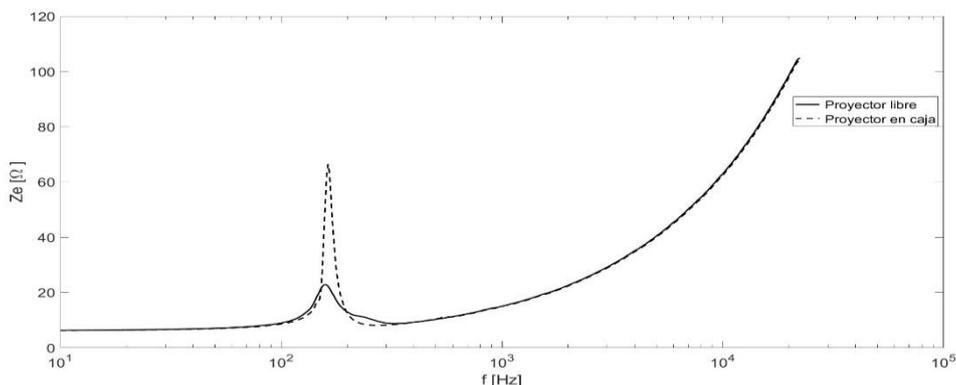


Figura 2. Impedancia eléctrica (Z_e).

Existen varios métodos para obtener los parámetros mecánicos, en este caso se ha optado por un método que relaciona el desplazamiento frecuencial con la variación de la masa mecánica y de la compliancia mecánica al añadir un volumen.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS}C_{MS}}} \text{ [Hz]} \quad (10)$$

$$f'_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{MS}+C_{MB}}{M'_{MS}C_{MB}C'_{MS}}} \text{ [Hz]} \quad (11)$$

Donde f_s es la frecuencia de resonancia del proyector radiando libremente y f'_s es la frecuencia de resonancia del proyector radiando en una caja. Además, C_{MB} siendo la compliancia mecánica de la caja asociado al volumen y la sección del proyector.

$$C_{MB} = \frac{V_B}{S_D^2 \rho c^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{N}} \right] \quad (12)$$

Siendo V_B el volumen de aire que contiene la caja en m^3 , S_D la sección del diafragma, y c la velocidad propagación del sonido en el medio (343 m/s en el aire).

Por otra parte, los parámetros puramente eléctricos (R_e y L_e) se obtienen directamente de los valores del módulo de la impedancia eléctrica. Si $\omega \ll$ entonces la impedancia eléctrica muestra un comportamiento totalmente resistivo, el cual está asociado al valor de R_e . En cambio, para valores de $\omega \gg$ la impedancia tiene un comportamiento inductivo y por tanto, está asociado a L_e .

$$|Z_e(0)| = R_e \text{ } [\Omega] \quad (13)$$

$$L_e = \frac{|Z_e(\omega)|}{\omega} \text{ [H]} \quad (14)$$

El resto de los parámetros se han obtenido mediante las relaciones con las variables de "Thiell-Small" (Q_{MS} , Q_{ES} , Q_{TS}).

$$R_{MS} = \frac{1}{C_{MS} 2\pi f_s Q_{MS}} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}} \right] \quad (15)$$

$$Bl = \sqrt{\frac{R_e}{2\pi f_s Q_{ES} C_{MS}}} \left[\frac{\text{T}}{\text{m}} \right] \quad (16)$$

Estos parámetros se han ajustado para que las curvas teóricas de impedancia eléctrica se asemejen a las curvas experimentales medidas. Las curvas de impedancia simuladas con los parámetros ajustados se muestran en la siguiente figura.

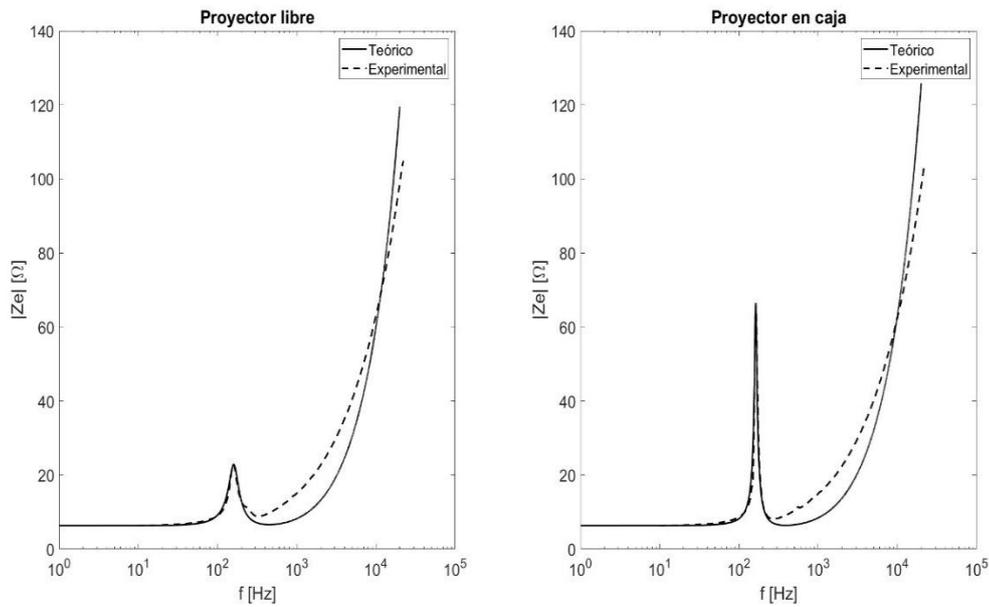


Figura 3. Curvas de impedancia ajustadas.

Una vez los parámetros están ajustados es posible estimar la velocidad a la que vibra la membrana del proyector con la ecuación 8. A fin de obtener de forma experimental la velocidad, en primer lugar, se ha medido el desplazamiento de la membrana del proyector mediante un sensor láser (Figura 4). Posteriormente, se ha calculado la primera derivada para obtener el valor de velocidad. Se han realizado dos configuraciones de medidas para distintas tensiones.

Las medidas de desplazamiento registradas se han realizado para dos frecuencias distintas de y múltiples tensiones comprendidas entre 2 V y 60 V. (Figura 5). Las frecuencias escogidas (100 Hz y 150 Hz) están por debajo de la frecuencia de muestreo del sensor láser (300 Hz).



Figura 4. Montaje para la medición del desplazamiento de la membrana.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este experimento no permiten caracterizar los parámetros mecánicos con certeza. Inicialmente, el ajuste de los parámetros mecánicos muestra una similitud entre la impedancia experimental obtenida y la impedancia simulada, tanto para las curvas del proyector radiando libremente como para el proyector radiando en la caja. En cambio, los resultados obtenidos de la velocidad de la membrana no muestran semejanza entre lo experimental y lo simulado.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos experimentalmente y los simulados para ambas frecuencias. Se aprecia en los resultados que la regresión lineal de las medidas experimentales para ambas frecuencias presenta una pendiente mayor en comparación a la pendiente de la regresión lineal de los valores simulados. Se observa en la pendiente, para el caso de 100 Hz, que la experimental es aproximadamente un 20% mayor que el valor de pendiente simulado. Por otro lado, para la configuración de 150 Hz se registra una mayor desviación del valor experimental respecto al simulado, el valor experimental es un 35% mayor que el simulado.

100 Hz		150 Hz	
Simulado	Experimental	Simulado	Experimental
0.021 $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0.026 $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0.029 $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0.045 $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

Tabla 1. Velocidad de la membrana en función del voltaje.

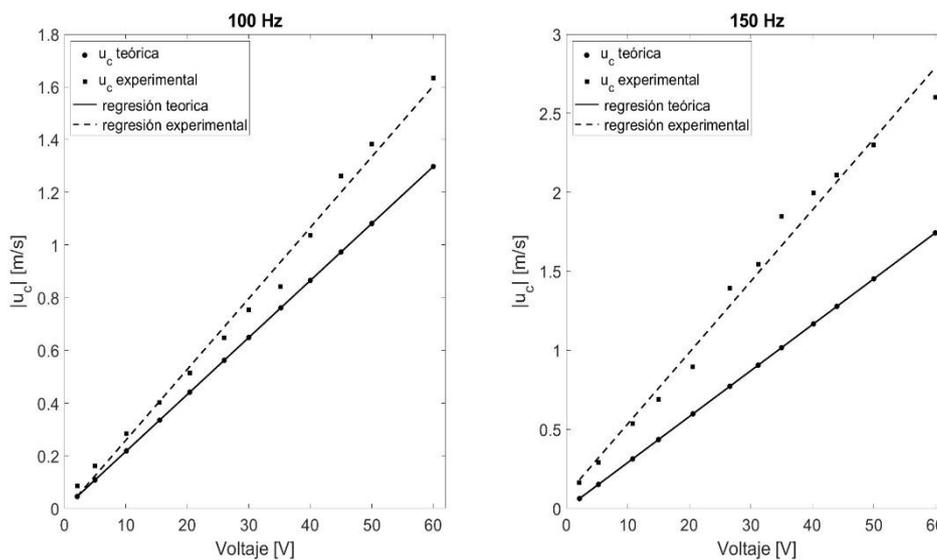


Figura 5. Velocidad de la membrana experimental y simulada.

Se observa también que, para los valores más bajos de tensión, la velocidad presenta una mayor similitud entre los valores experimentales y los simulados. Este fenómeno se aprecia con mayor claridad en la siguiente figura, donde se está representando los valores de velocidad

simulados y los valores de la regresión lineal para el caso de 100 Hz. Se aprecia que a partir de los 5 V la diferencia entre los valores simulados y la regresión empieza a ser notable.

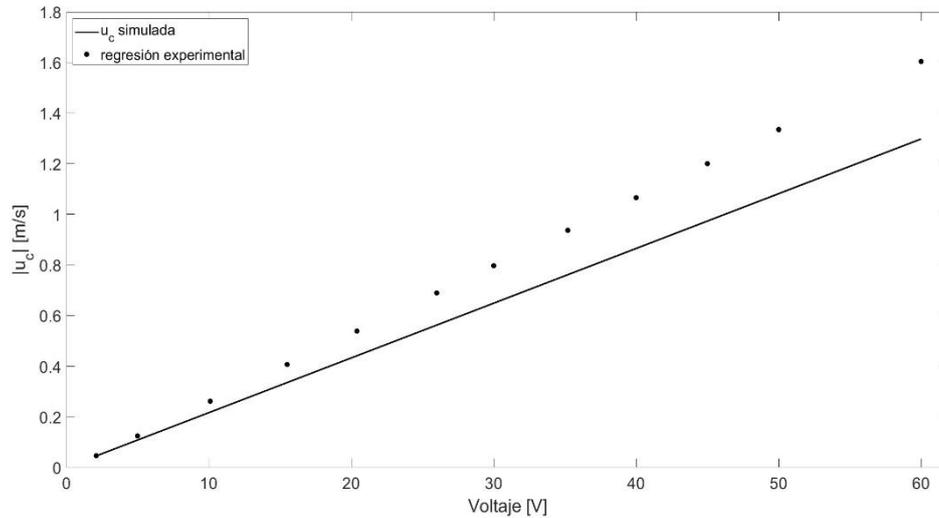


Figura 6. Regresión lineal de las medidas experimentales a 100 Hz y los valores de velocidad simulados.

4. CONCLUSIONES

Como conclusión del experimento realizado se puede resumir que a partir de los resultados obtenidos no se han podido caracterizar correctamente los parámetros mecánicos del proyector radiando en aire y por tanto, tampoco en agua. En cambio, se ha establecido un punto de inicio para que en futuros proyectos se tenga en cuenta que el comportamiento electromecánico del proyector varía en función de la tensión, es decir, que existe un comportamiento no lineal. Asimismo, los resultados obtenidos apuntan a que el proyector estudiado está diseñado para trabajar correctamente a potencias altas.

Como línea futura, se propone la correcta caracterización de los parámetros electromecánicos del proyector y la radiación de potencia acústica en aire y agua. Para ello, se utilizarán sensores con mayor resolución y frecuencia de muestreo mayor para estudiar un mayor número de frecuencias.

De igual modo, se realizarán estudios más en profundidad sobre el comportamiento no lineal del proyector y se diseñarán simulaciones en elementos finitos para cuantificar y caracterizar este comportamiento tanto en aire como en agua.

La correcta caracterización del proyector permitirá su uso en diversas aplicaciones de la acústica submarina como la calibración de diversos sensores submarinos e hidrófonos, y su uso en técnicas activas como la emisión de firmas acústicas de distintas fuentes de ruido que afectan al entorno marino.

REFERENCIAS

- [1] Luna Fernández, D. (2016). Caracterización de hidrófonos de bajo coste y su aplicación en estudios bioacústicos..
- [2] Beranek, L. L., & Mellow, T. J. (2012). Acoustics: Sound Fields and Transducers, chapter 6.