



## PRIMEROS PASOS EN EL DISEÑO DE SISTEMA RADIANTE DEL TIPO DML PARA ACÚSTICA SUBMARINA

*Pedro Poveda-Martínez<sup>1\*</sup>; Jesús Carbajo-San-Martín<sup>1</sup>; José Martíenz-Iranzo<sup>1</sup>; Enrique G. Segovia-Eulogio<sup>2</sup>; Umberta Tinivella<sup>3</sup>; Marta Cianferra<sup>4</sup>; Jaime Ramis-Soriano<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante.

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS. Italy

<sup>4</sup>Dipartimento di Ingegneria e Architettura. University of Trieste

### RESUMEN

En la actualidad existe una necesidad de disponer de fuentes sonoras adecuadas para reproducir sonidos de baja frecuencia por debajo del agua. Los técnicos involucrados en el problema han recurrido a sistemas radiantes basados en altavoces de tipo electrodinámico, con los consiguientes accesorios. En este trabajo se presenta el proceso seguido para el desarrollo de un sistema radiante basado en el concepto de DML en el que, como es sabido, un actuador excita una placa que vibra y radia al medio. Las características del sistema radiante dependen tanto del actuador como de las dimensiones y propiedades mecánicas de la placa. Se ha diseñado y construido un recinto estanco que permite cambiar la placa y comparar distintas opciones. Después de llevar a cabo una serie de simulaciones, se han llevado a cabo las primeras pruebas experimentales. La potencia acústica radiada puede ser controlada desde el exterior, previa calibración, mediante la señal captada por un acelerómetro colocado en el sistema vibrante.

### ABSTRACT

Currently there is a need for suitable sound sources to reproduce low-frequency sounds underwater. The technicians involved in the problem have resorted to radiant systems based on electrodynamic loudspeakers, with the consequent accessories. This paper presents the process followed for the development of a radiating system based on the DML concept in which, as is known, an actuator excites a plate that vibrates and radiates to the medium. The characteristics of the radiating system depend on both the actuator and the dimensions and mechanical properties of the plate. A sealed enclosure has been designed and built to allow

the plate to be changed and to compare different options. After some simulations, the first experimental tests have been carried out. The radiated acoustic power can be controlled from the outside, after calibration, by means of the signal captured by an accelerometer placed in the vibrating system.

**Palabras Clave**— DML, underwater sound source, actuator, plate, accelerometer.

### 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

La acústica submarina es un elemento fundamental para los peces. Dadas las condiciones ambientales en las que se encuentran, sentidos como la visión, el tacto o el olfato están completamente limitados y, por tanto, el sonido les permite conocer su entorno y comunicarse con otras especies. Actualmente se encuentran catalogadas más de 800 especies capaces de producir sonido. Los sonidos les permiten obtener información relevante respecto a disputas del territorio, a ataques de depredadores o incluso a situaciones reproductivas [1 – 3].

El sistema auditivo de los peces se encuentra formado tres elementos principales: el oído interno, la vejiga natatoria y la línea lateral [4, 5, 6]. El primero de ellos es el órgano auditivo principal, y se encuentra localizado en la cavidad craneal. Se trata de un sistema de masa inercial, compuesto por una estructura densa de carbonato cálcico que, al desplazarse, entra en contacto con diferentes células sensoriales (células ciliadas) generando señales eléctricas que son interpretadas como sonido por el pez. El segundo, la vejiga natatoria, proporciona información a partir de los cambios de volumen que experimenta como consecuencia de la incidencia de una onda sonora [7]. Se convierte en una nueva fuente de

---

\* **Autor de contacto:** [pedro.poveda@ua.es](mailto:pedro.poveda@ua.es)

**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

radiación, estimulando el oído interno del pez. Por último, encontramos la línea lateral, compuesta por multitud de células ciliadas que proporcionan una señal eléctrica proporcional al movimiento de agua [8]. El aparato auditivo descrito anteriormente representa un sistema extremadamente complejo y eficaz que proporciona al individuo no solo información del sonido, sino también de la dirección de procedencia de este.

Desafortunadamente, la actividad del ser humano en océanos y mares se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas [10-12]. Esto ha provocado un aumento del ruido subacuático, alterando el paisaje sonoro y, por consiguiente, empeorando el estado de bienestar del ecosistema marino. Un ruido excesivo puede interferir en el comportamiento de los peces enmascarando la comunicación y comprometiendo su preservación y supervivencia. Sin embargo, no es el único elemento que se ve influido por el ruido. Tal y como apuntan diferentes estudios, el ruido puede generar problemas físicos por lesiones internas o daño en los sistemas sensoriales de los animales [6, 13-17]. Su influencia se ha observado en bivalvos, cefalópodos o crustáceos, mostrando comportamientos de alarma ante la proximidad de estímulos sonoros [18, 19]. Del mismo modo, el ruido es responsable de ciertas alteraciones en el metabolismo de los peces y genera un aumento del nivel de los parámetros bioquímicos relacionados con el estrés [20-22]. Bajo determinadas condiciones puede generar cambios fisiológicos subletales como la reducción de la tasa de crecimiento o una disminución de la reproducción. Por este motivo, resulta de vital importancia profundizar en el conocimiento sobre los efectos que genera el ruido en las diferentes especies.

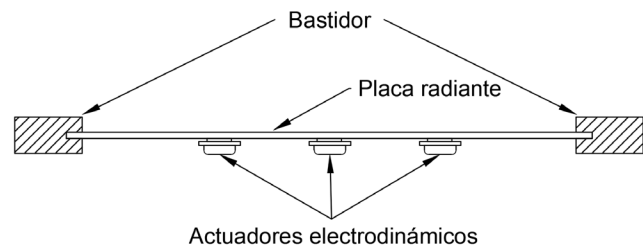
Tal y como apuntan Suedel et al. [23], existe una variación notable en el ancho de banda del sistema auditivo de los vertebrados marinos. No obstante, todos ellos tienen la capacidad de percibir sonidos de baja frecuencia con valores de entre 10 y 1000 Hz. Llevar a cabo un estudio completo de la influencia del ruido en animales marinos supone, por tanto, disponer de una fuente capaz de excitar el medio a dichas frecuencias. Los sistemas existentes actualmente en el mercado, por norma general se basan en la utilización de altavoces electrodinámicos como elemento de perturbación del medio. Las prestaciones de este tipo de sistemas a la hora de radiar en baja frecuencia suponen una limitación a tener en cuenta en los estudios realizados.

En este trabajo se presenta el proceso seguido para el desarrollo de un sistema radiante basado en el concepto de DML (*Distributed Mode Loudspeaker*). Asimismo, se incluyen simulaciones preliminares y medidas experimentales del sistema. Por otro lado, el trabajo se completa con el análisis numérico del campo sonoro en el interior de un tanque de agua con el objetivo de validar la

posible configuración experimental a emplear en el estudio de la influencia del ruido en el bienestar de los peces.

## 2. ALTAVOCES DML

Los altavoces de modos distribuidos (DML en sus iniciales en inglés) consisten en un actuador que está adherido a una placa (figura 1). El actuador juega el papel de transductor electrodinámico, provocando la excitación necesaria para que la placa vibre y radie sonido. En función de las características de ambos equipos, se obtendrá una respuesta frecuencial determinada. Por un lado, destacan la masa mecánica y la compliancia del actuador, que marcarán la impedancia eléctrica total del dispositivo y, por tanto, su rango frecuencial. Por otro, tenemos las características mecánicas de la placa: densidad, módulos de elasticidad; así como las condiciones de contorno a las que esté sometida. En [24, 25] se presenta una visión práctica de estos sistemas radiantes. Asimismo, Heilemann et al. [26] hacen una revisión exhaustiva de las contribuciones más relevantes en el diseño de los altavoces planos.



**Figura 1.** Esquema de un altavoz de modos distribuidos (DML).

## 3. PASOS EN EL PROCESO DE DISEÑO

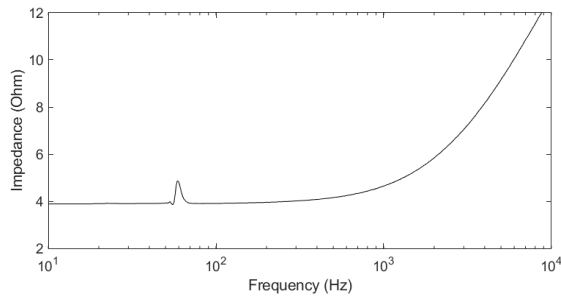
A continuación, se detallan los pasos seguidos en el proceso de diseño de la configuración experimental de la que forma parte el altavoz DML, y cuyo objetivo es la evaluación del impacto del ruido en peces.

### 3.1. Selección de potenciales actuadores. Caracterización.

Tal y como se indicó en la sección 1, de acuerdo con el sistema auditivo de los peces, las frecuencias bajas resultan fundamentales a la hora de relacionarse y comunicarse con otros individuos. Por este motivo, el sistema de excitación seleccionado para la configuración experimental debe ser capaz de radiar a frecuencias bajas, al menos, cercanas a 50 Hz. Por ello, se ha optado por un actuador electrodinámico Multicom Pro (figura 2), de 50 W<sub>rms</sub>, con una frecuencia de resonancia mecánica de 58 Hz. En la figura 3 se muestra la curva de impedancia eléctrica obtenida de forma experimental mediante el analizador electroacústico CLIO.



**Figura 2.** Actuador Multicom Pro Bass Transducer.



**Figura 3.** Impedancia eléctrica total del actuador Multicom Pro en función de la frecuencia.

### 3.2. Selección del material de la placa.

Teniendo en cuenta las condiciones en las que va a ser utilizado el sistema de excitación (medio marino), se optó por un material capaz de soportar grandes esfuerzos (presión hidrostática) además de ser resistente a la degradación por ambientes agresivos (agua salada). Siguiendo estas directrices se consideró el Polioximetileno, conocido comúnmente como POM o Delrin. Se trata de un material fácil de mecanizar y con multitud de aplicaciones. Su resistencia mecánica, su estabilidad dimensional y sus propiedades dieléctricas, lo hacen apropiado para aplicaciones en entornos marinos. En una primera aproximación, se utilizaron las características proporcionadas por el fabricante (ver tabla 1), aunque sus características reales serán obtenidas en etapas posteriores en el laboratorio.

**Tabla 1.** Parámetros estándar para el Polioximetileno (POM).

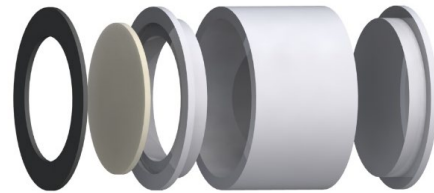
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo Elast. [GPa]	Coef. Poisson
1190	3.2	0.35

### 3.3. Diseño del primer prototipo. Dimensiones y modelado en elementos finitos.

El prototipo desarrollado presenta un diámetro exterior de 300 mm con una superficie radiante de 327 cm<sup>2</sup> de diámetro

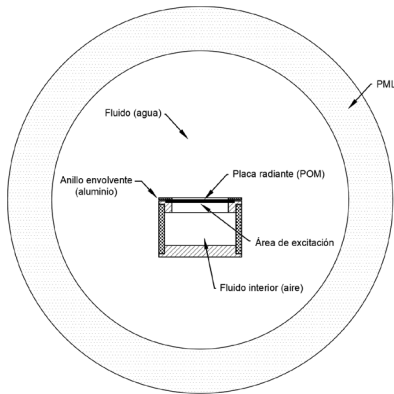
y un volumen interior de 7.56 l. La parte frontal del altavoz se encuentra formada por tres piezas en disposición tipo sándwich. La primera corresponde a la base del frontal, cuya misión es albergar la placa radiante y unirla con el cuerpo del sistema (parte cilíndrica). En segundo lugar, encontramos la placa, cuya vibración provocará la radiación en el medio. El sistema desarrollado permite la sustitución y/o modificación de dicho elemento, pudiendo en todo momento evaluar diferentes materiales o espesores. Finalmente, observamos el anillo envolvente, que se encargará de garantizar la sujeción de la placa alrededor de su perímetro (figura 4).

Con objeto de garantizar la estanqueidad del sistema y evitar la penetración de agua en la zona de instalación del actuador (volumen interno), los contornos de la placa radiante se diseñan de forma que descansen sobre juntas tóricas de goma, que, a pesar de comprimirse cuando se cierra el dispositivo, permitirán cierta movilidad del elemento.



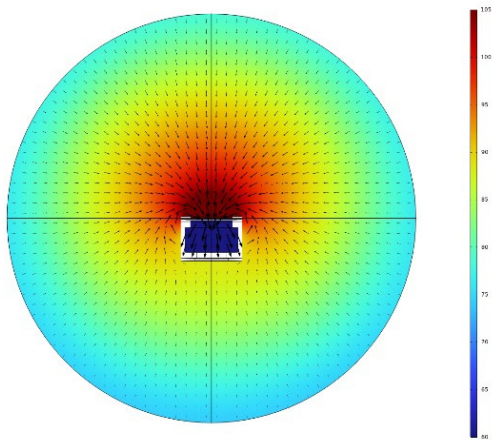
**Figura 4.** Despiece del primer prototipo sobre el que se ensayarán actuadores y distintos materiales para la placa.

A partir del modelo 3D diseñado, se llevó a cabo una simulación numérica simplificada del dispositivo en elementos finitos. Se trata de verificar el comportamiento del altavoz y establecer, de forma aproximada, su rango de funcionamiento. En el modelo implementado se consideró la interacción fluido-estructura, quedando formado por cuatro dominios básicos: superficies sólidas del altavoz, volumen de aire interno, volumen de aire externo y PML (figura 5). Como consideración inicial para el análisis del prototipo, se estableció una condición de contorno rígida en el perímetro de la placa. Asimismo, el interior de la lámina radiante se excitó con una velocidad normal a la superficie y constante para un rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. El modelo se malló con un tamaño máximo y mínimo de elemento de 13 cm y 9.6 mm respectivamente, resultando un total de 99344 elementos. Mediante la simulación se determinó la presión en un plano perpendicular a la fuente, así como el nivel de presión sonora a una distancia de 1 m en su eje.

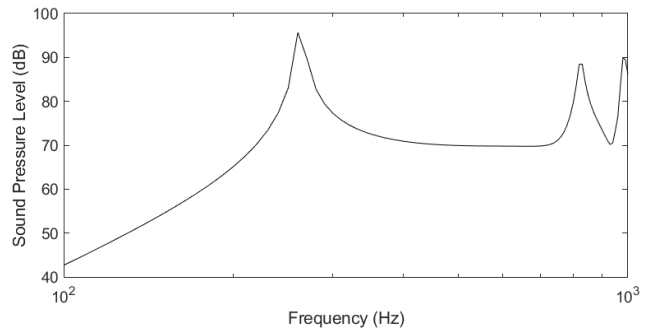


**Figura 5.** Representación de los distintos dominios incluidos en el modelo en elementos finitos.

Los resultados muestran un comportamiento omnidireccional de la fuente para todo el rango frecuencial analizado (figura 6). Asimismo, el nivel de presión sonora a 1 m de la fuente establece una respuesta espectral del sistema adecuado para frecuencias por encima de 260 Hz (ver figura 7). Cabe mencionar que el espesor empleado para la placa, de 10 mm, posee una rigidez elevada. Esto hecho conlleva una limitación en cuanto a la radiación de frecuencias bajas. Asimismo, para frecuencias por encima de los 825 Hz, el comportamiento modal de la placa adquiere una mayor relevancia.



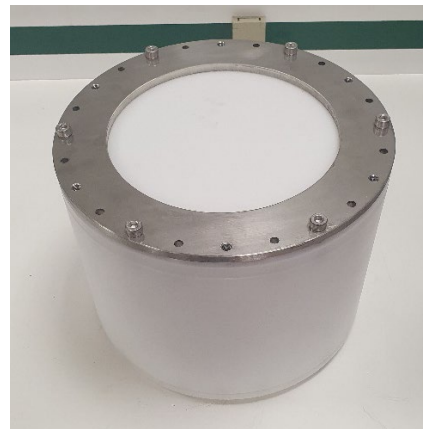
**Figura 6.** Campo sonoro (SPL) para una frecuencia de 300 Hz.



**Figura 7.** SPL en el eje de la fuente a 1 m de distancia.

### 3.4. Fabricación del primer prototipo. Instalación del acelerómetro

El altavoz submarino se fabricó siguiendo las directrices del diseño, resultando en el prototipo mostrado en la figura 8. El despiece del sistema puede observarse en la figura 9.



**Figura 8.** Primer prototipo del altavoz submarino.



**Figura 9.** Despiece del prototipo desarrollado.

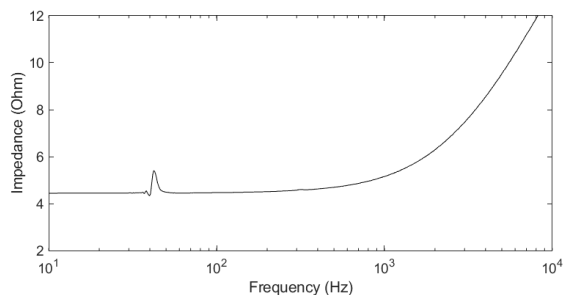


Dentro del altavoz, adherido mediante tornillos a la cara interior de la placa radiante, se situó el actuador. Asimismo, se dispuso en dicha superficie un acelerómetro miniatura modelo ADXL 100xZ con una sensibilidad de 20 mV/g y una frecuencia de resonancia de 42 kHz (figura 10). Mediante este sensor será posible conocer en todo momento la potencia radiada por el altavoz.

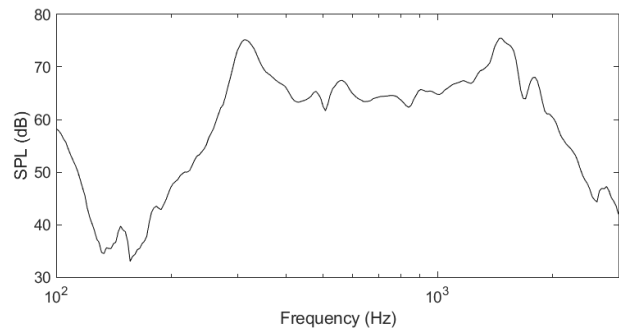


**Figura 10.** Disposición del actuador en la placa radiante. Situación del acelerómetro para la obtención de la potencia de radiación del altavoz.

En primer lugar, se llevaron a cabo medidas de la impedancia eléctrica del sistema, obteniendo una frecuencia de resonancia próxima a los 42 Hz (figura 11), ligeramente por debajo de la del actuador aislado. Posteriormente, para valorar el rango de funcionamiento del sistema se llevan a cabo medidas del nivel de presión sonora a 1 m de la fuente. Las pruebas iniciales se realizan empleando una placa radiante de 10 mm de espesor. Los ensayos tienen lugar en el interior de una cámara semianecoica con un nivel de ruido de fondo inferior a 23 dB. La figura 12 muestra la respuesta en frecuencia obtenida para el altavoz, con un ancho de banda comprendido entre 300 Hz y 1500 Hz. La frecuencia de corte inferior del altavoz se aproxima a la obtenida de forma numérica. A frecuencias por encima de los 1500 Hz nos encontramos fuera del rango de funcionamiento del actuador, por lo que este no es capaz de generar un desplazamiento efectivo de la placa radiante. Esto conlleva una disminución del SPL.



**Figura 11.** Impedancia eléctrica del sistema completo con placa radiante de 10 mm.



**Figura 12.** Respuesta en frecuencia medida en el interior de cámara semianecoica a una distancia de 1 m del altavoz en el rango de 100 Hz a 3 kHz en aire

#### 4. CONCLUSIONES

La opción de utilizar un altavoz de tipo DML parece prometedora ya que los primeros resultados indican que, eligiendo adecuadamente el material de la placa vibrante (espesor y parámetros mecánicos) se puede conseguir que la respuesta en frecuencia en agua empiece alrededor de los sesenta Hz. Una ventaja adicional es que el sistema vibrante se puede instalar directamente sobre cualquiera de las paredes del tanque.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto PCI2022-135081-2, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR”, ; MCIN el acrónimo del Ministerio de Ciencia e Innovación; AEI el acrónimo de la Agencia Estatal de Investigación; 10.13039/501100011033 el DOI (Digital Object Identifier) de la Agencia; y PRTR el acrónimo del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

#### REFERENCIAS

- [1] Hawkins, A.D. and K.J. Rasmussen. The calls of gadoid fish. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 58:891-911. 1978.
- [2] Hawkins, A. D. Underwater sound and fish behaviour,” in *Behaviour of Teleost Fishes*, edited by T. J. Pitcher (Chapman and Hall, London). 1993.
- [3] Popper, A. N., Salmon, M., and Horch, K. W. Acoustic detection and communication by decapod crustaceans,” *J. Comp. Physiol. A* 187, 83–89. 2001.
- [4] Ladich F. Fish bioacoustics. *Curr Opin Neurobiol.* 2014 Oct;28:121-7. doi: 10.1016/j.conb.2014.06.013.

- [5] Popper, A. N. and Hawkins, A. D. The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.* 143 (1). 2018.
- [6] Popper, A. N. and Hawkins, A. D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. of fish biology.* 1-22. 2019.
- [7] Schulz-Mirbach T, Metscher B, Ladich F (2012) Relationship between Swim Bladder Morphology and Hearing Abilities—A Case Study on Asian and African Cichlids. *PLoS ONE* 7(8): e42292. doi:10.1371/journal.pone.0042292
- [8] Monroe, J. D.; Rajadinakaran, G.; Smith, M. E. Sensory hair cell death and regeneration in fishes. *Front. Cell. Neurosci.* 9:131. 2015. doi.org/10.3389/fncel.2015.00131
- [10] Clark CW, Ellison WT, Southall BL, Hatch L, Van Parijs SM, Frankel A, Ponirakis D (2009) Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Mar Ecol Prog Ser* 395:201-222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>
- [11] Merchant, N.D.; Fristrup, K.M.; Johnson, M.P.; Tyack, P.L.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Parks, S.E. Measuring acoustic habitats. *Methods Ecol. Evol.* 2015, 6, 257–265.
- [12] Williams, R., Clark, C.W., Ponirakis, D., Ashe, E., 2014a. Acoustic quality of critical habitats for three threatened whale populations. *Anim. Conserv.* 17 (2), 174–185.
- [13] Popper, A. N.; Hice-Dunton, L.; Higgs, D.M.; et al. Offshore wind energy development: research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *J. Acous. Soc. Am.* 141. 2022.
- [14] Hawkins, A. D. The potential impact of offshore wind farms on fishes and invertebrates. *Advances in Oceanography and Marine Biology.* 2020.
- [15] Roberts, L. and Laidre M. E. Finding a home in the noise: cross-modal impact of anthropogenic vibration on animal search behaviour. *Biology Open.* 8. 2019.
- [16] Frédéric Olivier, Mathilde Gigot, Delphine Mathias, Youenn Jezequel, Tarik Meziane, et al. Assessing the impacts of anthropogenic sounds on early stages of benthic invertebrates: The “Larvosonic system”. *Limnology and Oceanography: Methods,* 2023, 21 (2), pp.53-68.
- [17] Hawkins, A. The adverse effects of underwater sound upon fishes and invertebrates. *Int. J. of Oceanography and aquaculture.* 7(1). 2023.
- [18] Jeroen Hubert, Rosalie Moens, Rob Witbaard, Hans Slabbekoorn, Acoustic disturbance in blue mussels: sound-induced valve closure varies with pulse train speed but does not affect phytoplankton clearance rate, *ICES Journal of Marine Science,* Volume 79, Issue 9, November 2022, Pages 2540–2551, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac193>
- [19] Gosling E. 1992. *The Mussel Mytilus: Ecology, Physiology, Genetics and Culture.* Elsevier, Amsterdam.
- [20] Mauro M, Pérez-Arjona I, Perez EJB, Ceraulo M, Bou-Cabo M, Benson T, Espinosa V, Beltrame F, Mazzola S, Vazzana M, Buscaino G. The effect of low frequency noise on the behavior of juvenile *Sparus aurata*. *J Acoust Soc Am.* 2020 Jun;147(6):3795. doi:10.1121/10.0001255. PMID: 32611157.
- [21] Vazzana M, Mauro M, Ceraulo M, Dioguardi M, Papale E, Mazzola S, Arizza V, Beltrame F, Inguglia L, Buscaino G. Underwater high frequency noise: Biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.* 2020 Apr; 242:110650. doi: 10.1016/j.cbpa.2020.110650. Epub 2020 Jan 8. PMID: 31923630.
- [22] Codarin A., Wysocki L. E., Ladich F., Picciulin M. 2009. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Marine Pollution Bulletin,* 58: 1880–1887.
- [23] Suedel, B.C., McQueen, A.D., Wilkens, J.L., and Fields, M.P. (2018). Evaluating effects of dredging-induced underwater sound to aquatic species: A literature review. *DOER technical notes collection, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.* In Press
- [24] Tech Ingredients. Fantastic DIY Speakers for less than \$30. <https://www.youtube.com/watch?v=zdkyGDqU7xA>
- [25] Tech Ingredients. World’s Best Speakers. <https://www.youtube.com/watch?v=CKIye4RZ-5k&t=678sM>.
- [26] C. Heilemann, D. A. Anderson, S. Roessner, and M. F. Bocko, “The Evolution and Design of Flat-Panel Loudspeakers for Audio Reproduction”. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 69, no. 1/2, pp. 27–39, (2021 January/February). DOI: <https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0057>