



EFFECTO DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN TANQUES SOBRE LAS SEÑALES HIDROFÓNICAS

*Ruben Fraile Muñoz**, *Sara Pérez Rodríguez*, *Gianna Arencibia Castellanos*,
Juana María Gutiérrez Arriola, *María Castillo Moral*

CITSEM, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

La obtención de parámetros descriptores del comportamiento de los peces durante su proceso de cría en instalaciones de acuicultura resulta muy relevante en la evaluación de la calidad de este proceso. Uno de los rasgos más descriptivos de tal comportamiento es el movimiento, tanto de cada individuo como de todo el grupo. Y resulta evidente que el movimiento de los peces provoca, a su vez, perturbaciones en el medio acuático que los rodea. La cuestión que se analiza en este trabajo es si es posible obtener información sobre el movimiento del agua a partir de una señal unidimensional como la señal acústica captada por un hidrófono. Para ello, se ha instalado un hidrófono de banda ancha, que alcanza frecuencias infrasónicas, en diversas posiciones de un tanque de agua y se ha provocado el movimiento de la misma mediante dos dispositivos diferentes. Se presentan diversos análisis de la relación entre la potencia de estos dispositivos y la energía de la señal en diversas zonas del espectro.

ABSTRACT

The measurement of objective parameters describing fish behavior in aquaculture is relevant for evaluating the quality of their raising process. Swimming movement is an important aspect of such behavior, and this may be described both at individual and group levels. It is fairly evident that fish movement causes dynamic perturbations in the surrounding aquatic environment. The question approached in this research work is whether information about water movement can be obtained from a one-dimensional signal, such as the one captured by a hydrophone. For this purpose, a wideband hydrophone reaching the infrasonics band has been placed in several positions inside a water tank for capturing the acoustic signal corresponding to the water movement caused by two different devices. The relation between the power of such devices and the signal energy in several spectral bands is reported.

Palabras Clave— Acústica subacuática, Monitorización del agua, Procesamiento de señales acústicas.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización automática tanto del ambiente acuático como del comportamiento de los peces en instalaciones de acuicultura se está convirtiendo en necesaria con el fin de reducir riesgos para los propios peces y mejorar la productividad [1]. Particularmente, la monitorización basada en tecnología acústica lleva más de una década utilizándose con finalidades como la estimación del número de peces en tanques, o la medida de su crecimiento [2]. Entre los sistemas acústicos de monitorización se puede distinguir entre sistemas activos, cuyo funcionamiento se basa en el análisis conjunto de señales transmitidas y recibidas (e.g. sistemas SONAR), y sistemas pasivos, que procesan únicamente las señales captadas por hidrófonos [3]. Estos últimos son preferibles en el caso de especies especialmente sensibles a estímulos acústicos en las frecuencias de trabajo de los sistemas activos [3]. Típicamente, la utilización de sistemas pasivos de monitorización acústica tiene como objetivo analizar los sonidos emitidos por los peces, por ejemplo mientras son alimentados [4], considerando ruido el sonido captado proveniente otras fuentes.

En este trabajo se analiza la viabilidad de usar sistemas pasivos de monitorización acústica para supervisar el comportamiento natatorio de los peces. El comportamiento natatorio se ha monitorizado previamente mediante sistemas activos (e.g. [2]). La propuesta de monitorizarlo usando sistemas pasivos se basa en la hipótesis de que las vibraciones del agua provocadas por los peces al nadar son detectables como señal de baja frecuencia por un hidrófono. Esta hipótesis tiene dos partes: en primer lugar, se supone que las vibraciones del agua tienen un impacto identificable sobre la señal hidrofónica; en segundo lugar, la veracidad de la hipótesis implica que el movimiento de los peces es capaz de generar vibraciones con energía suficiente como para ser

* *Autor de contacto*: r.fraile@upm.es

Copyright: ©2023 Fraile 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.

detectada por el hidrófono. Aquí se trata de comprobar la primera parte de la hipótesis. Para ello, se han realizado experimentos de laboratorio sobre un tanque lleno de agua. En el tanque se ha instalado un hidrófono de banda ancha y se ha analizado el efecto que tiene sobre la señal hidrofónica el movimiento del agua provocado por dos dispositivos diferentes: un filtro de flujo constante y una bomba de circulación de agua.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Fuentes acústicas en medio subacuático

Típicamente la monitorización acústica pasiva en acuicultura se basa en analizar los sonidos emitidos directamente por los peces [3, 4] considerando otras fuentes como ruido. No existe mucha investigación relativa a fuentes acústicas detectables en tanques de acuicultura, pero algunos estudios indican que las vibraciones mecánicas producidas por flujos de agua, bombas, vibraciones del propio tanque, etc. producen señales acústicas de baja frecuencia, alcanzando incluso bandas infrasonicas [5]. En mar abierto, en zonas poco profundas (hasta unos 180 m), estudios ya clásicos también informan de que el movimiento del agua debido a vientos, ondas de superficie, turbulencias y similares, junto con los fenómenos sísmicos, tiene impacto sobre la zona más baja del espectro, alcanzando frecuencias tan bajas como 1 Hz [6, 7]. De todo ello se puede deducir que el impacto más relevante del movimiento del agua sobre la señal hidrofónica se espera en la banda de frecuencias infrasonica.

2.2. Velocidad de fase y modos

La velocidad de fase del sonido en el agua depende de factores como la temperatura, la salinidad, o la presión (que a su vez es función de la profundidad) [8]. En el caso de agua marina en aguas poco profundas y a temperaturas de en torno a 20°C la velocidad de fase tiene un valor cercano a 1500 m/s [8, 9].

En principio, las medidas acústicas realizadas en tanques de agua pueden verse muy afectadas por la aparición de modos que introduzcan discontinuidades en la respuesta del tanque. Ello provocaría que la relación entre la energía de la fuente acústica (el movimiento de los peces en este caso) y la energía de la señal hidrofónica fuera muy diferente en las frecuencias modales con respecto al resto. La distancia entre modos consecutivos en tanques de agua se puede estimar como [10]:

$$\Delta f_{\text{MOD}} = \frac{c^3}{4\pi f_{\text{MOD}}^2 \cdot V} \quad (1)$$

siendo c la velocidad de fase, f_{MOD} la frecuencia central del modo, y V el volumen del tanque. Tomando como referencia una velocidad de fase de 1500 m/s y una frecuencia máxima

de 30 Hz, se tendría la siguiente relación aproximada entre volumen y distancia entre modos:

$$\Delta f_{\text{MOD}} \approx \frac{298000}{V} \quad (2)$$

Para que apareciera un modo por debajo de 30 Hz, y teniendo en cuenta que se ha considerado $f_{\text{MOD}} = 30$ Hz, se debería cumplir:

$$\Delta f_{\text{MOD}} \leq 30 \text{ Hz} \Rightarrow V \geq \frac{298000}{30} \approx 9950 \text{ m}^3 \quad (2)$$

es decir, se necesitarían tanques que en el caso de ser cúbicos deberían tener una arista con una longitud superior a 21 m. Dado que los tanques típicamente usados en acuicultura tienen un tamaño mucho menor [5], y el tanque usado en el laboratorio para este experimento es aún más pequeño, se puede suponer que en este caso no hay frecuencias modales en la banda infrasonica.

2.3. Absorción

De modo general, la absorción de energía en el medio acuático es mucho menor que en el medio aéreo [9]. Como la velocidad de fase, el coeficiente de absorción también depende de la salinidad del agua, pero de modo aproximado se puede suponer que es proporcional al cuadrado de la frecuencia [11] (más absorción a mayores frecuencias), con valores aproximadamente constantes a bajas frecuencias [10, 11]. Todo ello supone que en tanques de agua y en la banda de frecuencias de infrasonidos los tiempos de reverberación serán largos, factor que debe ser tenido en cuenta para realizar el diseño experimental.

3. EXPERIMENTOS

3.1. Montaje

La evaluación del efecto del movimiento del agua sobre la señal hidrofónica se realizó sobre un tanque de agua montado en el laboratorio. La Figura 1 muestra una fotografía del montaje y un croquis de la planta hexagonal del tanque. La superficie del tanque era de 0,351 m², y fue rellenado con agua salada (salinidad de 30 g/l) hasta una altura de aproximadamente 0,420 m, resultando pues un volumen de agua de aproximadamente 0,147 m³.

El agua del tanque era filtrada usando un filtro Eheim ecco de 5 W de potencia nominal, con un caudal de 0,5 m³/h. La Figura 1 muestra la ubicación de la salida y el retorno de agua del tanque. El extremo de la manguera de retorno estaba situado por encima de la superficie del agua.

Además, en una de las paredes laterales del tanque (ver Figura 1) se colocó una bomba de circulación de agua SunSun CW-110 con potencia regulable hasta un máximo nominal de 10 W. El accionamiento de esta bomba no suponía flujo de agua neto a través del tanque como en el caso del filtro.

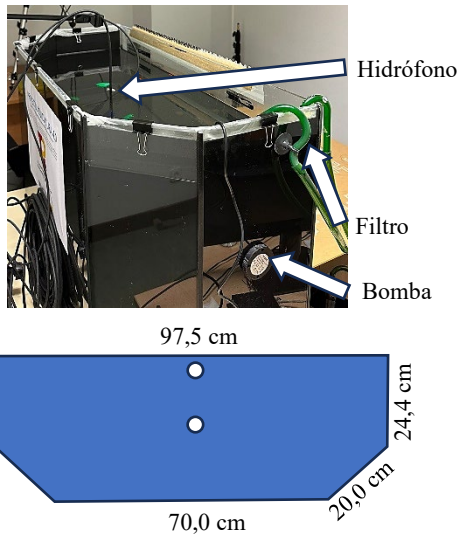


Figura 1. Tanque de agua en el laboratorio (foto y croquis de planta).

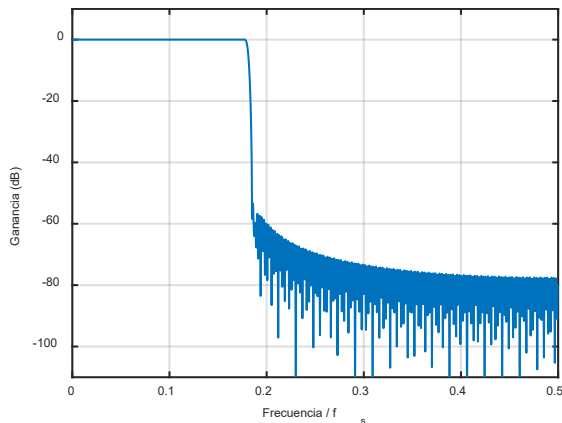


Figura 2. Respuesta del filtro paso bajo. La frecuencia es relativa a la frecuencia de muestreo.

3.2. Hidrófono

Las medidas se realizaron utilizando un hidrófono omnidireccional CR1A de Cetacean Research montado con un preamplificador Reson VP2000. Este sistema proporciona en su conjunto una banda de paso a -3 dB máxima desde 1 Hz hasta 48 kHz. La frecuencia de corte superior de la banda de paso del preamplificador se fijó en 1 kHz, teniendo en cuenta que la banda de interés quedaba muy por debajo de ese límite.

La digitalización de la señal se hizo con una tarjeta SpectraDAQ200 usando 24 bits de cuantificación y una frecuencia de muestreo estándar de 44,1 kHz. La tarjeta tiene

una frecuencia de corte inferior de 2 Hz, por lo que la banda de frecuencias del sistema global se extendía desde los 2 Hz hasta 1 kHz.

La ubicación del hidrófono en el tanque se fijó usando un soporte externo (Figura 1) en las dos ubicaciones marcadas en el croquis de planta del tanque (Figura 1, abajo) con un círculo.

3.3. Procesamiento de la señal

Con el fin de reducir el coste computacional se realizó un proceso de diezmado por factor 8, resultando una frecuencia de muestreo efectiva de 5512,5 Hz. Para evitar distorsiones de fase en la aplicación de un filtro antisolapamiento, el proceso se realizó en tres etapas, consistente cada una en un filtrado seguido de un diezmado por factor 2. Para el filtro de cada etapa se eligió un filtro de fase lineal con la respuesta ilustrada en la Figura 2, que tiene una frecuencia de corte a -3dB inferior al 20% de la frecuencia de muestreo.

El espectro de las señales filtradas y diezmadas ha sido estimado usando el algoritmo de Welch [12] con segmentos de 1 s.

3.4. Protocolo experimental

De modo general, el procedimiento de medida consistió en: (i) ubicar el hidrófono en la posición deseada, (ii) accionar el filtro, o ajustar la potencia de la bomba, y (iii) realizar una grabación de la señal hidrofónica. La duración de la grabación se estableció en un mínimo de 2,5 s con el fin de garantizar un promedio de al menos 4 segmentos de 1 s de audio con un solapamiento del 50% en la estimación del espectro.

En lo que se refiere a la ubicación del hidrófono, se eligieron una posición central y otra junto a la pared del tanque, tal como se indica en la Figura 1. En ambas posiciones se realizaron grabaciones con el hidrófono a tres profundidades: en el fondo, a media profundidad, y cerca de la superficie.

En el caso de la bomba la potencia era regulable, aunque el regulador no ofrecía información cuantitativa sobre la potencia de funcionamiento. Para estimarla se midió la intensidad de corriente proporcionada al sistema regulador-bomba por la fuente de alimentación de 24 V. Se eligieron tres posiciones del regulador, correspondientes al mínimo de potencia de funcionamiento, al máximo, y a un valor intermedio. Las potencias estimadas a partir de las medidas fueron de 1,03 W, 4,32 W, y 8,04 W.

Por otra parte, teniendo en cuenta la baja absorción del agua a bajas frecuencias se analizó cuál debía ser el tiempo mínimo transcurrido entre el ajuste del filtro o la bomba (paso

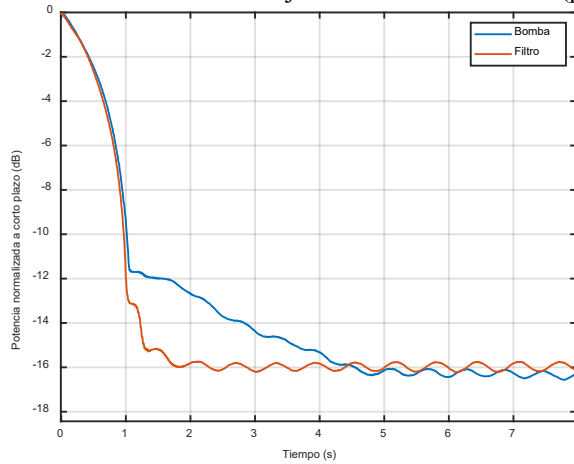


Figura 3. Evolución de la potencia normalizada a corto plazo (segmentos de 1 s) tras la desconexión de filtro y bomba en el instante inicial ($t = 0$).

ii) y la grabación (paso iii). Para realizar este análisis se realizaron dos grabaciones, una con el filtro activo y otra con la bomba, durante las cuales se desconectaron estos sistemas en un momento determinado. La Figura 3 muestra la evolución de la potencia media a corto plazo de la señal grabada a partir del momento de desconexión de filtro o bomba ($t = 0$). El intervalo de promedio fue de 1 s de duración y la potencia se normalizó con respecto al máximo antes de desconectar.

Tal como se aprecia en la gráfica, en ambos casos la potencia de la señal antes de la desconexión es unos 16 dB superior a la situación de reposo. También en ambos casos durante el primer segundo tras la desconexión se produce un descenso de 12 dB en la potencia. En el caso peor (el de la bomba), 5 s después de la desconexión se alcanza el régimen permanente de reposo. Consecuentemente, se decidió garantizar un intervalo de al menos 5 s entre el ajuste de filtro o bomba y el comienzo de la grabación.

4. RESULTADOS

4.1. Efecto del filtro de agua

La Figura 4 muestra los espectros de las señales grabadas con el hidrófono en las dos posiciones y tres profundidades antes indicadas, con y sin el filtro de agua en funcionamiento. Se ha representado el espectro entre 2 Hz y 30 Hz.

El filtro provoca un flujo de agua que es extraída del tanque por debajo del nivel de la superficie, y es vertida de vuelta al tanque por encima de la superficie. El retorno del agua provoca una onda superficial que es detectada por el

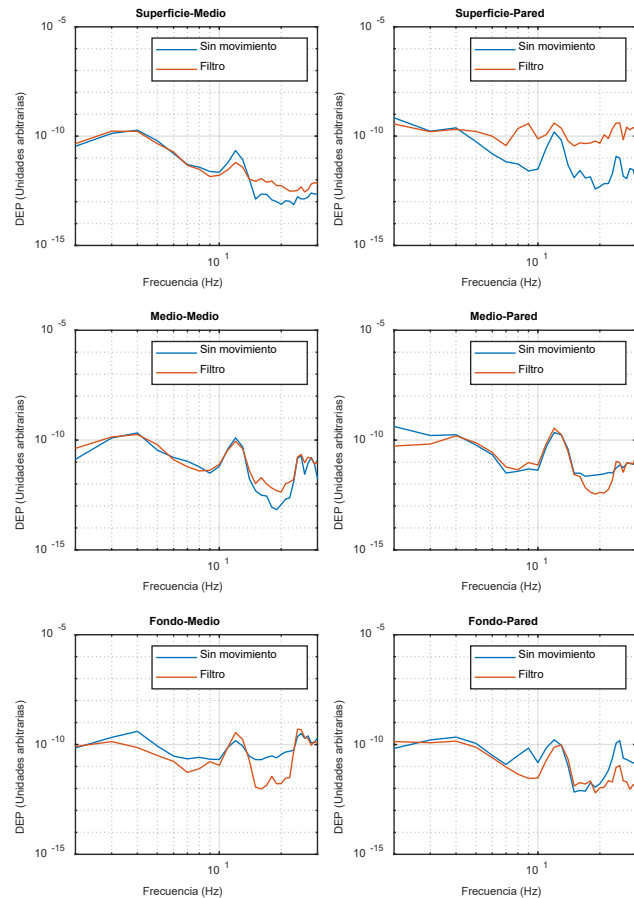


Figura 4. Efecto del filtro de agua sobre el espectro de la señal hidrofónica con el hidrófono situado en el centro (gráficas de la izquierda) y junto a la pared del tanque (derecha), y a tres profundidades diferentes: cerca de la superficie (arriba), a media profundidad (centro) y en el fondo (abajo).

hidrófono como un incremento en la energía entre 15 Hz y 30 Hz cuando es situado junto a la superficie. Alrededor de los 20 Hz esta tendencia se mantiene a media profundidad en el centro del tanque (gráfica “Medio-Medio” en la Figura 4), pero no junto a la pared. En las cercanías del fondo se observa un comportamiento llamativo en cuanto que la energía de la señal acústica es menor con el filtro encendido que con él apagado.

Para analizar estos resultados conviene considerar, en primer lugar, que el filtro fundamentalmente induce un flujo continuo, con pocas vibraciones de baja frecuencia, por lo que la similitud entre ambas señales por debajo de 10 Hz resulta razonable. Sin embargo, las paredes del tanque provocan condiciones de contorno de velocidad normal nula, lo que implica distorsiones en la onda acústica, incluso en su dirección de propagación [13], que resultan en efectos extraños. En las cercanías de superficie y pared, o de fondo y pared las condiciones son aún más singulares.

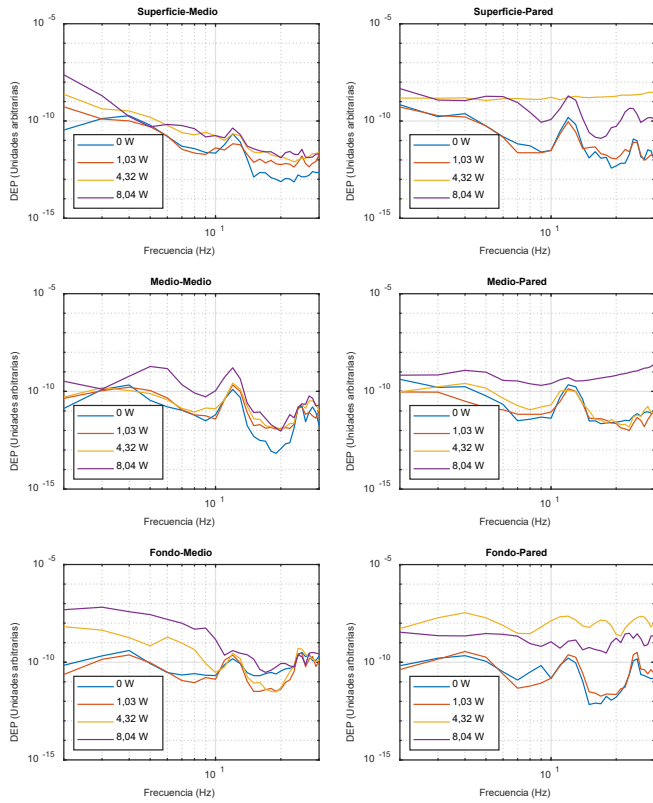


Figura 5. Efecto de la bomba sobre el espectro de la señal hidrofónica con el hidrófono situado en el centro (gráficas de la izquierda) y junto a la pared del tanque (derecha), y a tres profundidades diferentes: cerca de la superficie (arriba), a media profundidad (centro) y en el fondo (abajo). 0 W indica bomba desactivada.

4.2. Efecto de la bomba

La Figura 5 muestra los espectros obtenidos con las cuatro configuraciones de la bomba antes mencionadas: apagada (0 W), a baja potencia (1,03 W), a media potencia (4,32 W) y a máxima potencia (8,04 W) en todas las posiciones del hidrófono.

De modo general, se aprecia que las configuraciones de mayor potencia de la bomba (4,32 W y 8,04 W) se corresponden con mayores energías acústicas. Sin embargo, sólo se puede apreciar una ordenación de las gráficas coherente con la potencia de la bomba en la posición central del hidrófono y a media profundidad, es decir, en ausencia de condiciones de contorno que distorsionan la onda acústica [13]. Esta observación se puede confirmar analizando la relación entre la potencia de la bomba y la energía del espectro entre 2 Hz y 30 Hz. En la gráfica superior de la Figura 6 se puede observar cómo esa relación es monótona sólo en el caso de la posición central y a media profundidad, y que las mayores oscilaciones se dan en las cercanías de la pared del tanque. Cerca de las superficies limitantes del tanque, aunque se puede diferenciar entre las configuraciones

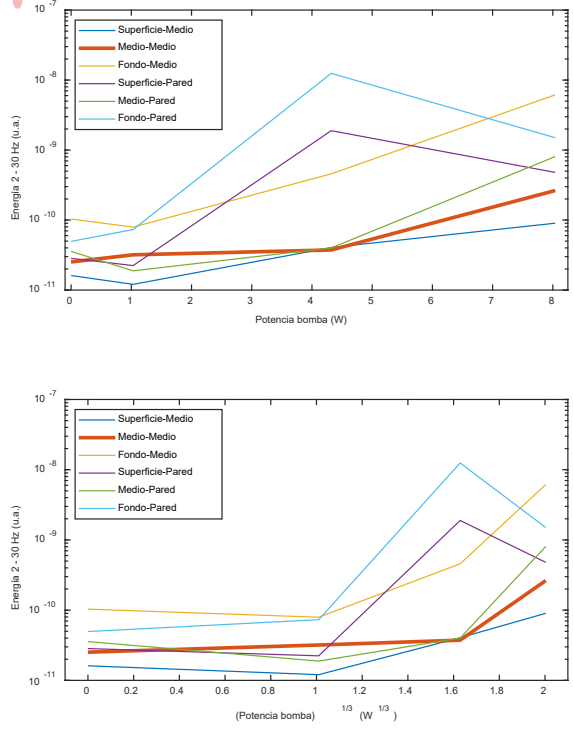


Figura 6. Relación entre la energía se la señal acústica entre 2 Hz y 30 Hz y la potencia de la bomba (arriba), y su raíz cúbica (abajo).

de menor potencia (0 W y 1,03 W) y las de mayor (4, 32 W y 8,04 W), no se cumple que una mayor potencia de la bomba implique una mayor energía de la señal acústica entre 2 Hz y 30 Hz.

En la gráfica de abajo de la misma Figura 6 se muestra la relación entre la energía de la señal en el mismo intervalo y la raíz cúbica de la potencia de la bomba, que se estima aproximadamente proporcional a la velocidad de giro y al caudal en bombas de rotación [14].

5. CONCLUSIONES

En los experimentos realizados se ha analizado la viabilidad de usar sistemas de monitorización acústica basados en hidrófonos para evaluar las vibraciones de baja frecuencia del agua asociadas a su movimiento. De los resultados obtenidos se puede concluir que las vibraciones del agua asociadas a movimientos observables de elementos mecánicos son detectables en la zona infrasónica del espectro de la señal hidrofónica. Cuando las vibraciones son superficiales, aparentemente es necesario situar el hidrófono cerca de la superficie para detectarlas. Sin embargo, cuando la fuente de movimiento es subacuática si el hidrófono se sitúa lejos de paredes, fondo y superficie del agua se observa una relación monótona entre la energía de la señal entre 2 Hz y 30 Hz y la velocidad de movimiento de los elementos causantes del movimiento, los álabes de la bomba en este caso.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada con fondos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, NextGenerationEU, por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través del proyecto “*Aplicación de tecnologías de visión e inteligencia artificial a la mejora del proceso productivo (Acuicultura 4.0)*” concedido en la convocatoria del “*Real Decreto 685/2021, de 3 de agosto, por el que se establecen las bases reguladoras de subvenciones a agrupaciones de entidades que realicen proyectos de inversión y reforma en materia de investigación para el desarrollo tecnológico, la innovación y el equilibrio de la cadena de comercialización en el sector pesquero y de la acuicultura en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y se convocan para 2021*”.

[11] F.H. Fisher y V.P. Simmons, “Sound absorption in sea water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, n° 3, pp. 558–564, 1977.

[12] P. Welch, “The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, n° 2, pp. 70–73, 1967.

[13] P.H. Rogers, A.D. Hawkins, A.N. Popper, R.R. Fay, y M.D. Gray, “Parvulescu Revisited: Small Tank Acoustics for Bioacousticians”, en *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, A. N. Popper y A. Hawkins, Eds: Springer, 2016, pp. 933–941.

[14] Europ. Assoc. for Pump Manufact. & Hydraulic Instit., *Variable speed pumping: A guide to successful applications*, Elsevier, 2004.

7. REFERENCIAS

[1] U.F. Mustapha, A. Alhassan, D. Jiang, y G. Li, “Sustainable aquaculture development: a review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA)”, *Reviews in Aquaculture*, vol. 13, n° 4, pp. 2076–2091, 2021.

[2] S.G. Conti, P. Roux, C. Fauvel, B.D. Maurer, y D. A. Demer, “Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank”, *Aquaculture*, vol. 251, n° 2–4, pp. 314–323, 2006.

[3] D. Li, Z. Du, Q. Wang, J. Wang, y L. Du, “Recent advances in acoustic technology for aquaculture: A review”, *Reviews in Aquaculture*, pp. 1–25, 2023.

[4] R. Mallekh, J.P. Lagardère, J.P. Eneau, y C. Cloutour, “An acoustic detector of turbot feeding activity”, *Aquaculture*, vol. 221, n° 1–4, pp. 481–489, 2003.

[5] A.N. Bart, J. Clark, J. Young, y Y. Zohar, “Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: a survey”, *Aquacultural Engineering*, vol. 25, n° 2, pp. 99–110, 2001.

[6] G.M. Wenz, “Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, n° 12, pp. 1936–1956, 1962.

[7] C.L. Piggott, “Ambient Sea Noise at Low Frequencies in Shallow Water of the Scotian Shelf”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, n° 11, pp. 2152–2163, 1964.

[8] W.A. Kuperman y P. Roux, “Underwater acoustics”, en *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007, pp. 149–206.

[9] T.G. Leighton, “Fundamentals of underwater acoustics”, en *Fundamentals of Noise and Vibration*, CRC Press, 1998.

[10] N. Cochard, J.L. Lacoume, P. Arzelies, y Y. Gabillet, “Underwater acoustic noise measurement in test tanks”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, n° 4, pp. 516–522, 2000.