

ESTUDIO NUMÉRICO DEL FACTOR DE BLANCO EN FUNCIÓN DE LA DURACIÓN DEL PULSO

PACS: (43.30.-k; 43.30.Bp).

Ladino Velásquez, Anderson¹; Pérez Arjona, Isabel¹; Espinosa Roselló, Víctor¹; Godinho, Luis²; Morillo Faro, Andrés¹.

¹Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC) Universidad Politécnica de Valencia, Paranimf 1, Grao de Gandía, Valencia, España.

{anlave@doctor.upv.es, iparjona@upv.es, vespinos@upv.es, anmofa@upv.es}

²ISEI, Dep. Eng. Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

{lgodinho@dec.uc.pt}

Palabras Clave: Factor de blanco, duración de pulso, ecosonda, simulación numérica, MFS.

ABSTRACT.

The scientific echo sounder that are currently used to estimate the biomass of species of commercial interest are configured so that the measurements of the acoustic data have a pulse duration for each working frequency, to establish the most appropriate to detect objects in relation to size, for which it is of interest to know and understand this variation of the backscattered field of an object for the different pulse durations emitted. Acoustic simulations are important to determine and characterize the acoustic dispersion of fish. In this work, a methodology for simulating the real temporal pulse of an echosounder using the meshless numerical simulation of fundamental solutions (MFS) method is proposed. For this, the decomposition of the spectral components necessary to adequately reproduce the original pulse emitted by the different pulse durations of the echosounder has been carried out. It has been possible to evaluate the algorithm in a first part by calculating the variation of the target strength (TS) and the reconstruction of the return pulse for different reference geometries of known sizes in the shape of a sphere and in a second part in the application for a real case of a 3D swimbladder using a computerized tomography (CT) of a Bluefin tuna.

RESUMEN.

Las ecosondas científicas que se utilizan actualmente para estimar la biomasa de las especies de interés comercial, son configuradas de tal manera que las mediciones de los datos acústicos tengan una duración de pulso para cada frecuencia de trabajo, con la finalidad de establecer la más apropiada para detectar objetos en relación al tamaño, por lo cual es de interés entender esta variación del campo retrodispersado para las diferentes duraciones de pulso emitidas. Las simulaciones acústicas son importantes para caracterizar la dispersión acústica de los peces. En este trabajo, se propone una metodología para la simulación del pulso temporal real de una ecosonda utilizando el método de simulación numérica sin malla de las soluciones fundamentales (MFS). Para ello, se ha realizado la descomposición de las componentes espectrales necesarias para reproducir adecuadamente el pulso original emitido por la ecosonda. Se ha evaluado el algoritmo en una primera parte calculando la variación del factor de blanco y la reconstrucción del pulso de vuelta para diferentes geometrías de tamaños conocidos con forma de esfera y en una segunda parte en la aplicación para un caso real de una vejiga natatoria en 3D usando una tomografía computarizada (TAC) de un atún rojo.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las especies más apreciadas del mar que durante los últimos años ha presentado un incremento en sus capturas generando una sobreexplotación de la especie, es el caso del atún rojo *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758), un pez perteneciente a la familia Scombridae que se le conoce como el atún rojo del atlántico, (ABFT, por sus siglas en inglés). Como consecuencia, la ICCAT (International for the Conservation of Atlantic Tunas) ha establecido un plan de recuperación limitando el periodo de captura [1]. Esta amenaza sobre la especie ha incentivado ser un foco de investigación, y actualmente ya se ha podido cerrar su ciclo biológico en cautividad, realizado por el Centro Español Oceanográfico de Murcia [2].

Desde el punto de vista científico existen varios objetivos que contribuyen a la conservación de la especie: domesticar el atún rojo, consumo de pesca sostenible y evaluar la viabilidad de las técnicas como mecanismo del proceso de engrase de los atunes en las plantas de producción. Por lo cual, los métodos acústicos activos son fundamentales para identificar las especies o para su monitorización, ayudando a resolver uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la regulación de la pesquería del ABFT.

Desde el punto de vista acústico la estimación de la biomasa se basa en la determinación del factor de blanco (TS, de sus siglas en inglés Target Strength), definido como la relación entre las intensidades acústicas incidente y retrodispersada cuando un objetivo es insonificado [3]. El TS se utiliza como un factor de escala decisivo para la abundancia de peces, debido a que se ha establecido relaciones entre TS y la longitud de los peces [4]. Un enfoque para determinar el TS es el cálculo teórico. Los modelos teóricos de retrodispersión acústica se utilizan para examinar la retrodispersión prevista de las especies que tienen importancia económica o ecológica [5]. Estos valores del TS se pueden obtener de modelos que estiman la retrodispersión de la vejiga natatoria y/o el cuerpo del pez, ya que cuando una vejiga está presente y llena de aire, es la responsable del 90% de la energía del eco, teniendo en cuenta la variación en las dimensiones físicas, la forma y la orientación de la vejiga natatoria [6]. El TS depende de la frecuencia de insonificación, la ausencia o presencia de la vejiga natatoria, el tamaño, el comportamiento y la morfología de los peces, como de su inclinación de nado con respecto al transductor [7-8].

El uso de las técnicas acústicas por medio de los ultrasonidos, han demostrado ser una herramienta eficaz y no destructivo para monitorizar la abundancia de los peces, estimar la biomasa [9] y para determinar la composición, la estructura y el estado físico de la composición de los tejidos de los peces [10-14]. En [15], se ha propuesto un método indirecto por medio de ultrasonidos para estimar la biomasa del ABFT con una buena concordancia entre las mediciones experimentales del TS y las predicciones numéricas utilizando el Método de las Soluciones Fundamentales (MFS, por sus siglas en inglés). De acuerdo con la definición del TS y los métodos estándar de medición [16 y 7], establece que se debe lograr una insonificación completa de la dispersión, es decir, una apertura del haz lo suficientemente amplia y una duración del pulso lo suficientemente larga para garantizar que el pez se ajuste al volumen insonificado por el pulso acústico. En [17], se ha estudiado el problema de la insonificación parcial del haz acústico en diferentes formas de objetos, ya que un objeto que está parcialmente insonificado puede tener un campo de retrodispersión mucho mayor que cuando el objeto está totalmente cubierto por el haz incidente.

De acuerdo con esto, el objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento y los efectos del TS variando la duración del pulso de la ecosonda. Como técnica de simulación acústica se ha utilizado las ventajas que tiene el MFS, debido a que en estudios anteriores ha resultado ser un método eficiente para este tipo de propósitos [18-20]. A través de procesamiento digital de señal, se ha podido optimizar el método numérico para la propagación y reconstrucción del pulso real de la ecosonda. Observando la variación del campo retrodispersado tanto en

geometrías sencillas con forma de esfera como en una vejiga natatoria de un ABFT, que se ha reconstruido a partir de una tomografía computarizada [21-23].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Duración del pulso y rango de una ecosonda

El sonar transmite una breve ráfaga de sonido, llamada pulso o ping, que contiene varios ciclos en la frecuencia de trabajo. En la Figura 1, se presenta a modo de ejemplo un pulso de 19 ciclos generado por un sonar de 38 kHz [16]. Para este caso la duración del pulso es $\tau = (19/38) = 0.5 \text{ ms}$. Si la velocidad de propagación acústica en el medio es de 1500 m/s , la longitud del pulso en el agua en cualquier instante es de $L_p = c\tau = 75 \text{ cm}$. La envolvente del pulso es la curva que muestra la amplitud de las oscilaciones. Por tanto, la envolvente que se presenta es un rectángulo, debido a que la amplitud es la constante durante la transmisión.

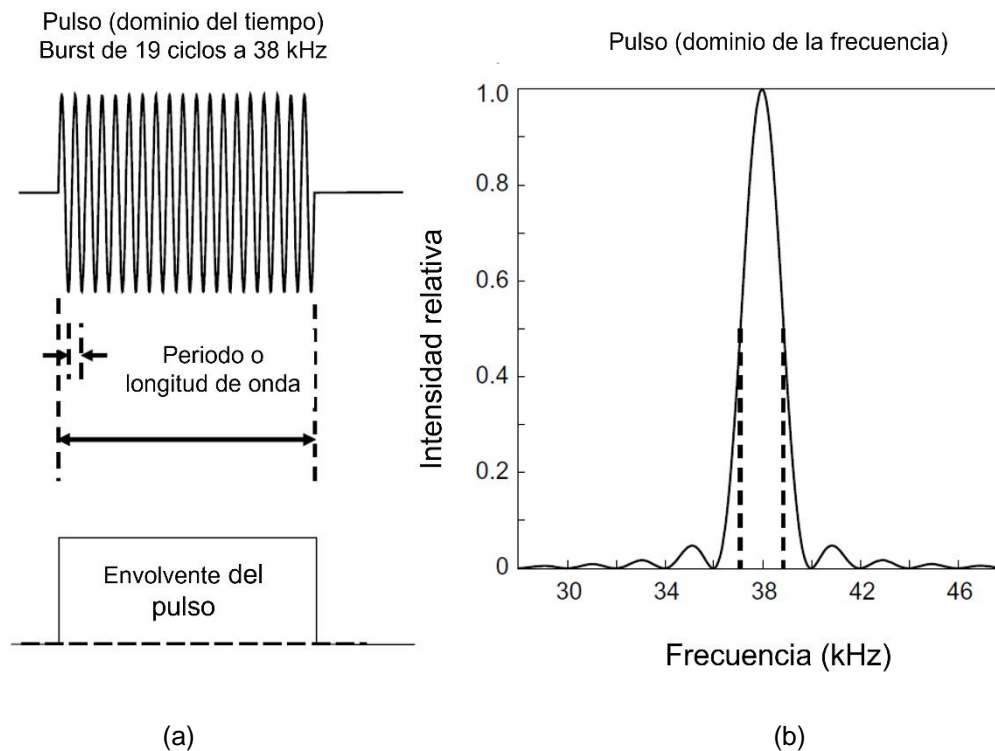


Figura 1 – Esquema de la transmisión del pulso. En la salida del transmisor: (a) El pulso es de 19 ciclos a 38 kHz en el dominio del tiempo. La envolvente es la curva que une las amplitudes máximas. (b) En el dominio de la frecuencia, el espectro muestra la composición de la frecuencia como la intensidad o potencia relativa al valor pico. Las líneas discontinuas indican el ancho de banda entre puntos de medida potencia, 1.8 kHz para este caso [16].

Cuando el pulso transmitido se aleja del transductor y encuentra un objetivo, parte de la energía es reflejada como el eco, que viaja de regreso al transductor (Ver Figura 2). El eco es recibido en el tiempo t_e después de la transmisión. La distancia d entre el objetivo y el transductor se estima midiendo t_e y la longitud del camino bidireccional es $2d$, por lo tanto:

$$t_e = 2d/c \quad (1)$$

$$d = ct_e/2 \quad (2)$$

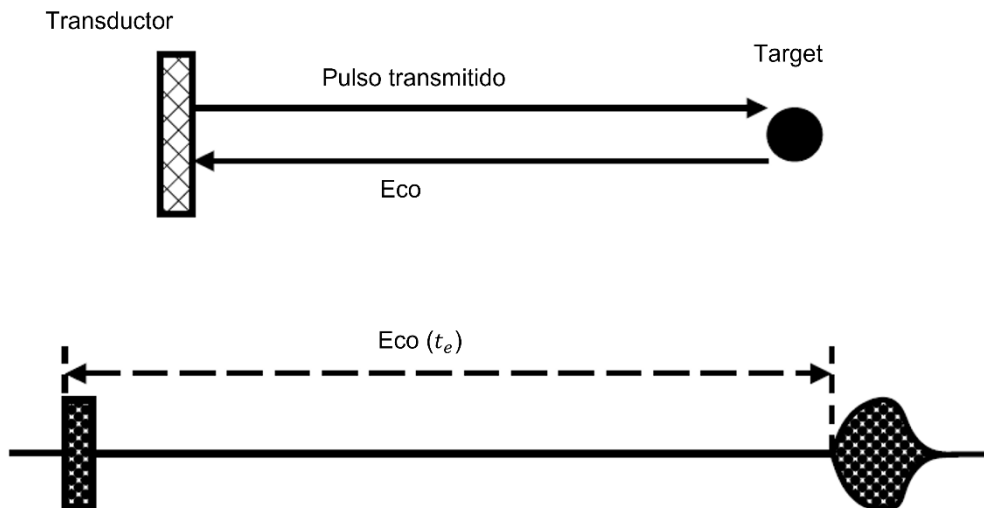


Figura 2 – El rango objetivo ($ct_e/2$) es estimado a partir del tiempo de retardo entre el pulso transmitido y el eco. La imagen inferior muestra a modo de ejemplo la forma de onda del pulso [16].

2.2. Método de las soluciones fundamentales (MFS)

El método de las soluciones fundamentales (MFS) es una técnica de simulación sin malla, que se basa en la superposición lineal de soluciones fundamentales para aproximar la solución del problema, asumiendo fuentes ubicadas fuera del dominio para evitar singularidades en la solución. Se basa en un enfoque de colocación sin requerir ninguna integración numérica. El método se ha aplicado con éxito para interpretar mediciones experimentales del Target Strength (TS) de otras especies grandes, y se puede encontrar una descripción completa del método de cálculo del TS en [18]. A continuación, se describe la descripción del MFS aplicado a este problema:

La propagación del sonido dentro de un espacio acústico homogéneo se puede representar matemáticamente en el dominio de la frecuencia mediante la ecuación diferencial de Helmholtz

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3)$$

dónde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ en el caso de un problema 3D, p es la presión acústica, $k = w/c$ el vector de onda, $w = 2\pi f$ la frecuencia angular, f la frecuencia y c la velocidad de propagación de la velocidad del sonido en el medio acústico.

Para el caso 3D, suponiendo una fuente puntual situada dentro del dominio de propagación, en el punto de coordenadas (x_0, y_0, z_0) , es posible establecer soluciones fundamentales G , para la presión sonora acústica, y H , para la velocidad de partícula, en un punto de coordenadas (x, y, z) , que se pueden escribir como:

$$G^{3D}(x, x_0, k) = \frac{e^{-ikr}}{r} \quad (4)$$

$$H^{3D}(x, x_0, k, \vec{n}) = \frac{1}{-i\rho\omega} \frac{(-ikr - 1)e^{-ikr}}{r^2} \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \quad (5)$$

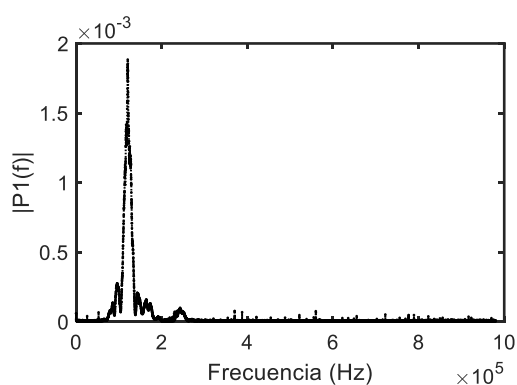
En estas ecuaciones, r corresponde a la distancia entre el punto de la fuente y el punto de dominio, dado que \vec{n} representa la dirección a lo largo de la cual se calcula la velocidad de partícula y ρ representa la densidad del medio. En [19], se presenta una detallada descripción del método, para el análisis del campo retrodispersado de un pez.

2.3. Reconstrucción del pulso

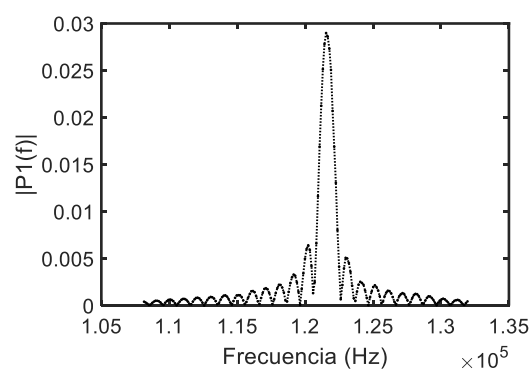
Para la reconstrucción numérica del pulso emitido por la ecosonda, se han realizado mediciones experimentales de las diferentes duraciones de pulso (64, 128, 512, 1024 y 2048 μ s) de la ecosonda EK60 Simrad a una frecuencia de trabajo de 120kHz [24] en el puerto Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia. Haciendo uso de la transformada discreta de Fourier (DFT-Discrete Fourier Transform) y de la transformada discreta inversa de Fourier se ha tomado la cantidad de componentes espectrales necesarias mínimas, para obtener la reconstrucción del pulso lo más parecida al pulso original emitido por la ecosonda. En la Tabla 1, se representa la longitud de cada duración del pulso, calculado para una velocidad de propagación en el agua ($c = 1500m/s$) como también la cantidad de componentes espectrales que fueron necesarios para la reconstrucción. En la Figura 3, se puede observar un ejemplo de la comparativa entre la señal del pulso original y la reconstrucción.

Tabla 1 – Características de cada duración de pulso.

Duración de pulso (μ s)	64	128	256	512	1024
Longitud del pulso (cm)	9.6	19.2	38.4	76.8	153.6
Componentes espectrales	400	400	200	200	200



(a)



(b)

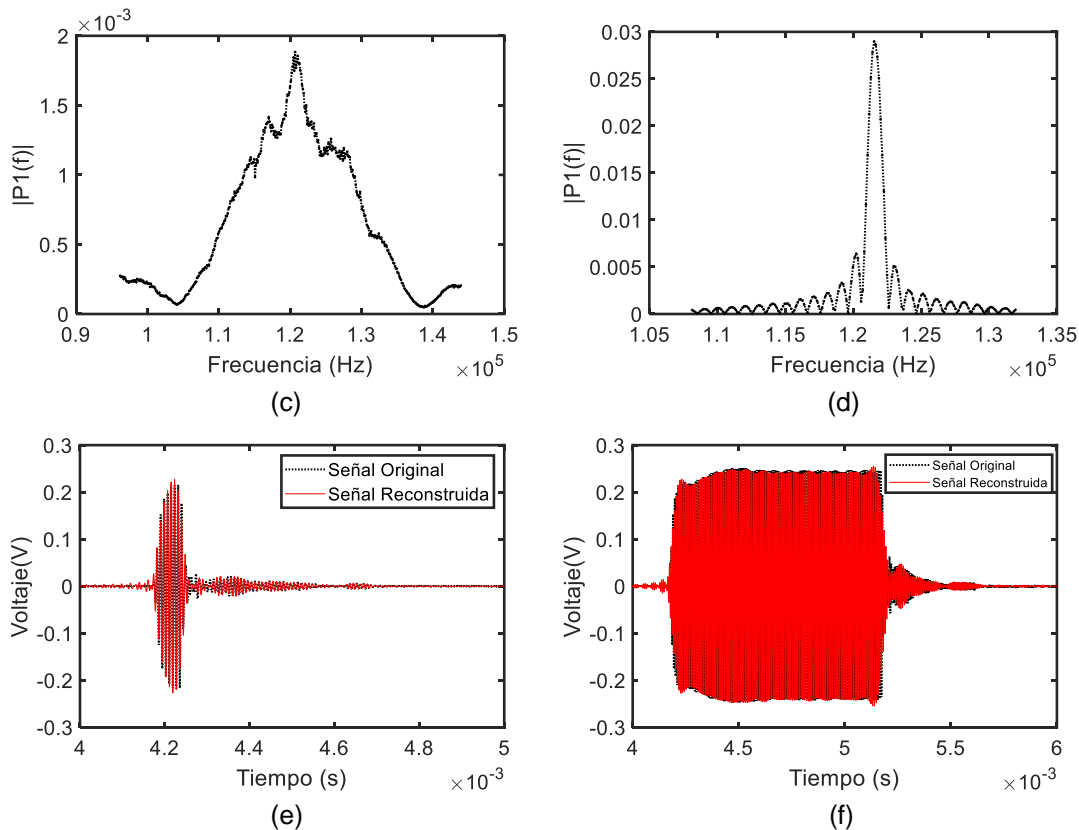


Figura 3 – FFT del pulso de la señal original de la ecosonda a diferentes duraciones de pulso (a) $64 \mu s$ y (b) $1024 \mu s$. FFT adaptada: (c) 400 componentes espectrales para $64 \mu s$ y (d) 200 para $1024 \mu s$. Comparativa de la señal original y la señal del pulso reconstruida para: (e) $64 \mu s$ y (f) $1024 \mu s$.

El algoritmo del método de las soluciones fundamentales (MFS), se ha configurado y adaptado para propagar la señal con la cantidad de las componentes espectrales descritas anteriormente para cada duración de pulso. En una primera parte, se ha realizado la simulación acústica para diferentes geometrías con forma de esfera con un radio de 1, 2, 4 y 5 cm. En la Figura 4 se puede observar a modo de ejemplo, la ubicación de los puntos de colocación en el contorno de la esfera y las fuentes virtuales, como también la comprobación de la dispersión acústica y la presión incidente. La ubicación del transductor se ha colocado a una distancia de 100m para garantizar que las simulaciones se realicen en condición de campo lejano y que el campo retrodispersado evolucione hasta su forma final de campo lejano cuando sea detectado por el transductor. El medio de contorno de la propagación acústica se ha configurado con propiedades de agua ($c_{agua} = 1490 m/s$, $\rho_{agua} = 1026 kg/m^3$) y la esfera con propiedades de aire ($c_{agua} = 343 m/s$, $\rho_{agua} = 1.2 kg/m^3$).

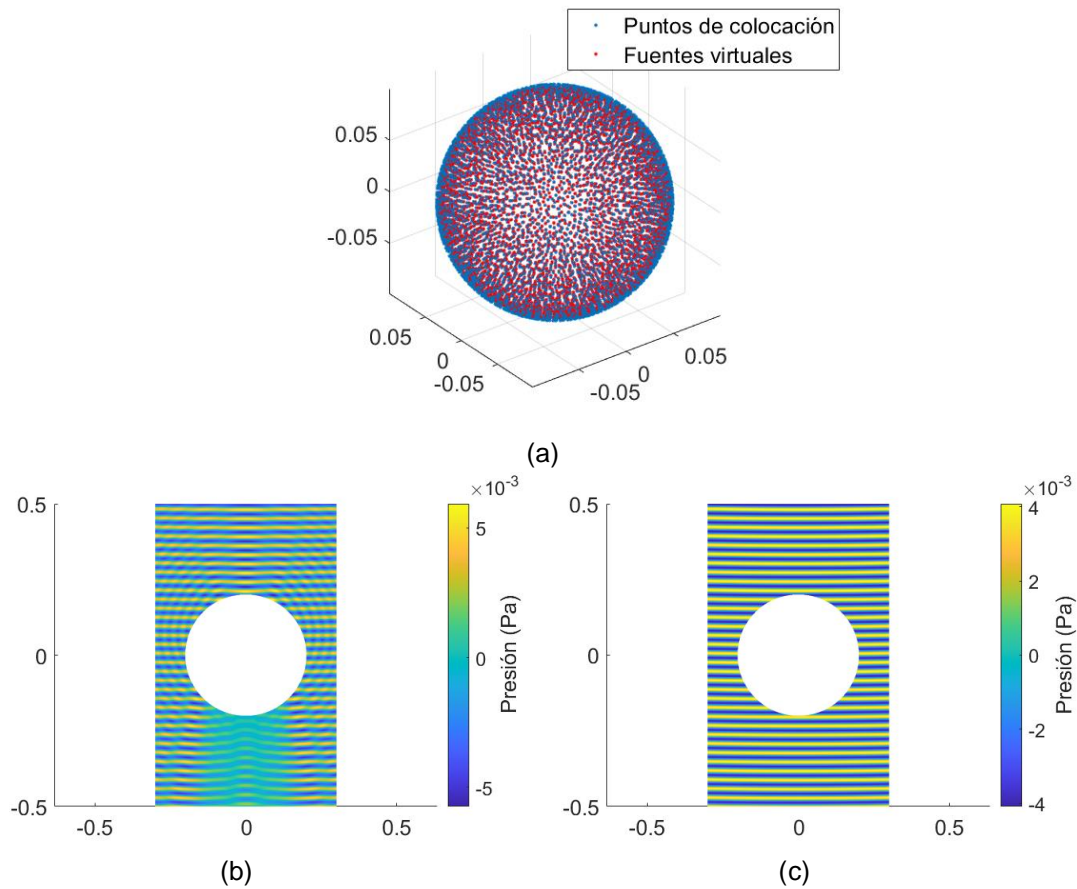


Figura 4 – (a) Puntos de colocación en la esfera y ubicación de las fuentes virtuales. (b) Ejemplo de la presión acústica dispersada en MFS. (c) Presión acústica incidente en MFS.

El cálculo del valor del TS objetivo se ha calculado con el valor de la distancia del transductor, la máxima presión acústica dispersada y la máxima presión acústica incidente en el centro del objetivo.

$$TS_{obj} = 10 \log \left(d \frac{p_d}{p_{inc}} \right)^2 \quad (6)$$

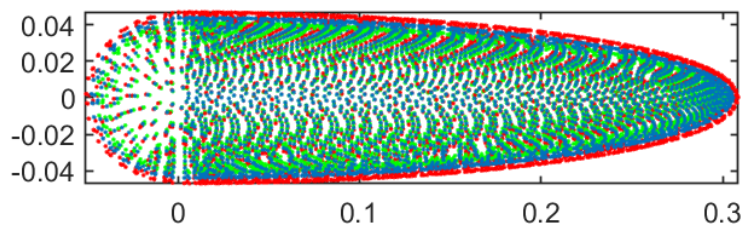
dónde d , es la distancia del transductor, p_d , la presión dispersada en el transductor y p_{inc} , la presión incidente en el centro del objetivo. Finalmente, la nueva señal retrodispersada del pulso de vuelta se ha reconstruido conociendo la presión dispersada sobre el transductor, la cual se ha normalizado con la relación de la presión dispersada en el transductor y la amplitud de la onda acústica emitida por el transductor, la cual depende directamente de la distancia y la presión incidente en el centro del objetivo.

En la segunda parte y como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado el cálculo de la variación del TS en una geometría simplificada en 3D de una vejiga natatoria que se ha obtenido como referencia de una tomografía computarizada (TAC) de un atún rojo, el cálculo se ha realizado tanto en una vejiga con posición horizontal y con una inclinación (Ver Figura 5). En

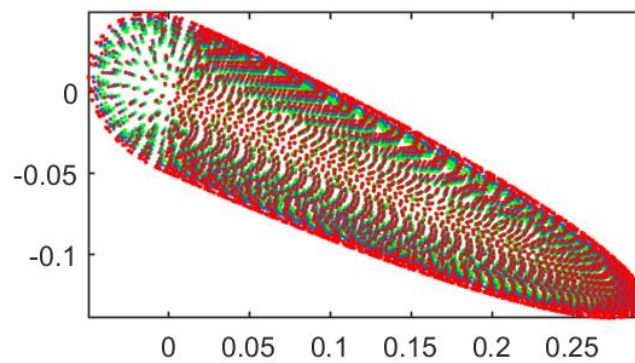
la Tabla 2, se puede observar las dimensiones del atún de referencia y el tamaño de la vejiga natatoria.

Tabla 2 – Valores de las dimensiones del atún y de la vejiga natatoria.

Dimensiones del atún (cm)		Dimensiones de la vejiga (cm)	
Longitud Furcal (LF)	104	Largo	35.15
Longitud Total (LT)	116	Ancho	8.6
Alto	27	Alto	3.46
Circunferencia	77		
Ancho	21		
Peso	21.9		



(a)



(b)

Figura 5 – Puntos de colocación (azules) y fuentes virtuales internas (verdes) y externas (rojas) en la geometría de una vejiga natatoria de un atún rojo en MFS. (a) Vejiga horizontal. (b) Vejiga inclinada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6, se muestra un ejemplo del resultado de la señal retrodispersada para una esfera de 5cm y para la vejiga en la posición horizontal y vertical. En la Tabla 3, se presenta los resultados de la variación del TS para los diferentes duraciones de pulso en la esfera y en la Tabla 4, los valores del TS para la geometría de la vejiga natatoria.

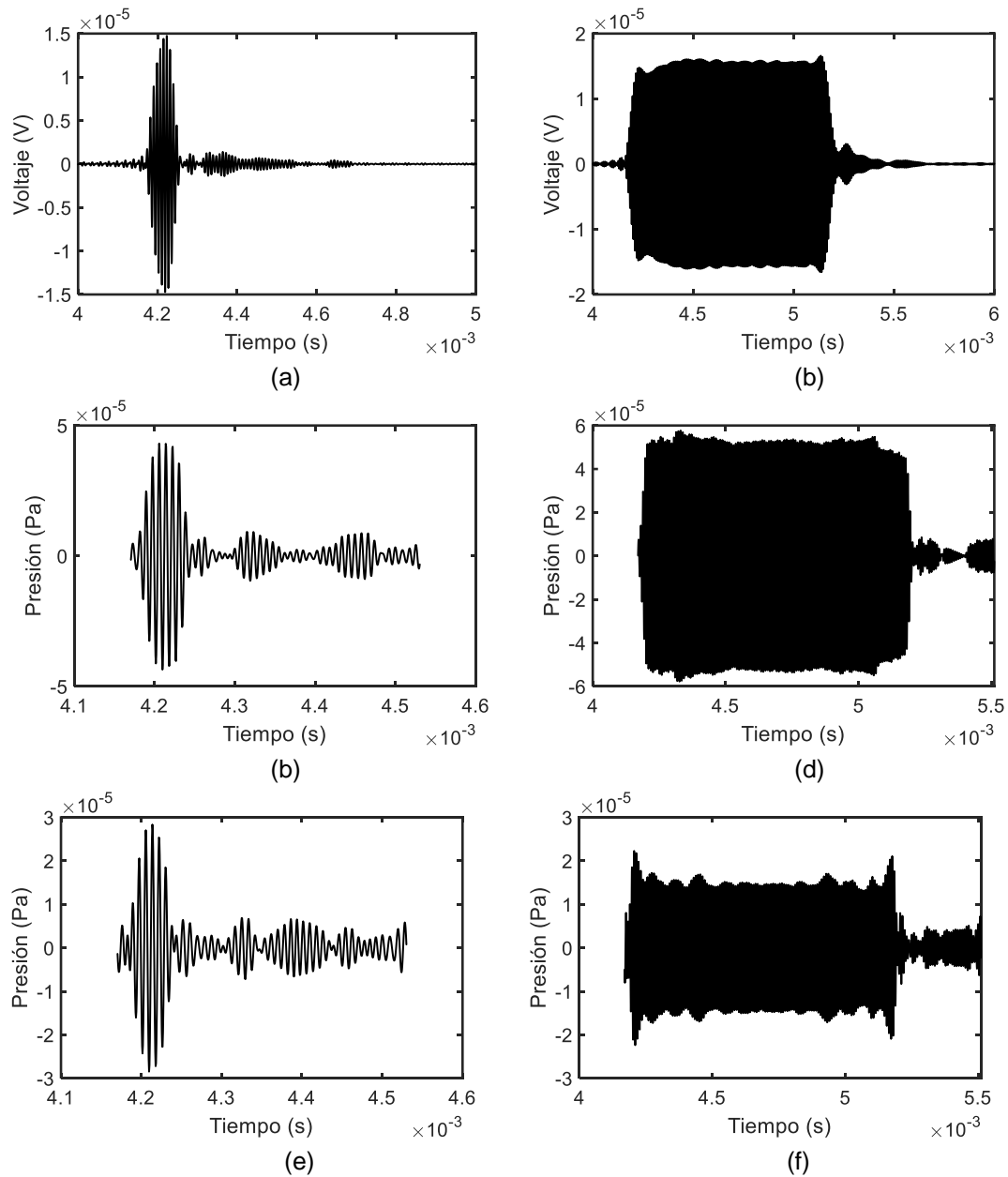


Figura 6 – Ejemplo de la señal reconstruida retrodispersada: en una esfera de 5cm (a) $64\mu\text{s}$. (b) $1024\mu\text{s}$. En la vejiga natatoria con posición horizontal: (c) $64\mu\text{s}$.(d) $1024\mu\text{s}$. En la vejiga natatoria inclinada: (e) $64\mu\text{s}$. (f) $1024\mu\text{s}$.

Tabla 3 – Variación del valor del TS en la geometría con forma de esfera.

r=1cm		
Duración de pulso (μs)	TS (dB) onda monocromática	TS (dB) señal retrodispersada
64	-45.0813	-44.4241
128		-44.5241
256		-45.0384
512		-45.0384
1024		-45.0384
r=2cm		
Duración de pulso (μs)	TS (dB) onda monocromática	TS (dB) señal retrodispersada
64	-39.1834	-38.7663
128		-38.7663
256		-38.8587
512		-38.8587
1024		-38.8587
r=4cm		
Duración de pulso (μs)	TS (dB) onda monocromática	TS (dB) señal retrodispersada
64	-35.5941	-32.0552
128		-32.0552
256		-33.2508
512		-33.2508
1024		-33.2508
r=5cm		
Duración de pulso (μs)	TS (dB) onda monocromática	TS (dB) señal retrodispersada
64	-31.7049	-31.4376
128		-31.4376
256		-31.4984
512		-31.4984
1024		-31.4984

Tabla 4 – Variación del valor del TS en la vejiga natatoria simplificada.

Duración de pulso (μs)	TS (dB) señal retrodispersada	
	Posición horizontal	Posición inclinada
64	-20.3174	-36.3207
128	-20.6021	-36.8247
256	-20.3377	-31.6443
512	-20.2849	-31.8181
1024	-19.9838	-32.8713

Para el caso de las geometrías con forma de esfera se puede observar que la variación del TS es mínima, al igual que para la vejiga natatoria horizontal. Sin embargo, para el caso de la vejiga con la posición inclinada se aprecia una variación del valor del TS de -4.67 dB entre las duraciones de pulso de 64 y 1024 μs . Esta variación puede ser debido a la hipótesis de que el valor del TS está relacionado con la zona insonificada. Como se ha mencionado, se debe lograr que el haz acústico tenga una completa insonificación de la dispersión acústica en el objetivo y que la duración del pulso sea lo suficientemente larga para garantizar que el objetivo se ajuste al volumen insonificado por el pulso acústico. Se observa que las variaciones del TS de la vejiga inclinada se dan para las duraciones de pulso de 64 y 128 μs , cuando tienen un tamaño entre 9 y 20 cm (Ver Tabla 1) con valores menores respecto al tamaño de la vejiga natatoria de aproximadamente 35cm, estando no completamente insonificado. Para el caso de

256, 512 y 1024 μs , donde el tamaño del pulso es superior al tamaño de la vejiga natatoria, se aprecia que la variación del TS es mínima.

3. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los estudios presentados en esta comunicación establecen una nueva ruta para utilizar el MFS con la finalidad de evaluar, describir y entender el complejo comportamiento del campo retrodispersado, teniendo en cuenta las diferentes duraciones del pulso real de la ecosonda. Una de las principales ventajas del MFS, es la ausencia de malla, lo que reduce el tiempo de cálculo computacional. En este trabajo hemos aplicado el MFS para geometrías complejas a partir de tomografías computarizadas como la vejiga natatoria del ABFT, logrando la simulación del modelo de dispersión acústica en campo lejano, del cual se han obtenido valores del TS para cada duración de pulso y observar la influencia de la inclinación de la vejiga natatoria al considerar la longitud del pulso en relación con el tamaño de la vejiga natatoria.

Así mismo, se propone realizar simulaciones numéricas que consideren los efectos del TS teniendo en cuenta la estructura interna de la columna vertebral y el tejido de la carne, para diferentes geometrías y tallas de peces, como también el análisis para diferentes frecuencias de trabajo en las ecosondas, ángulos de inclinación con respecto al eje del pez y la comparativa entre medidas experimentales y simulaciones numéricas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al grupo de investigación de acústica submarina de la Universidad Politécnica de Valencia del Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC-UPV), a las ayudas del Programa de Movilidad para estancias de doctorado en 2020 y a la colaboración en métodos numéricos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidade de Coimbra. El trabajado ha sido financiado por la Generalitat Valenciana por medio del proyecto AICO/2020/064 y el Gobierno de España a través de proyecto ACTHHUN ref. PID2021-127426OB-C21.

REFERENCIAS

- [1] “ICCAT,” 2021. <https://www.iccat.int/es/> (accedido Sep. 28, 2022).
- [2] “El IEO logra cerrar el ciclo biológico del atún rojo en cautividad - En Portada - Noticias web y revista digital de acuicultura. Publicación,” 2016. http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/49990/el_ieo_logra_cerrar_el_ciclo_biologico_del_atun_rojo_en_cautividad_.html (accedido Sep. 28, 2022).
- [3] Ladino, A.; Puig-Pons, V.; Espinosa, V.; Pérez-Arjona, I.; de la Gándara, F.; Ortega, A. Ultrasonic monitoring of early larval development of fish in tanks. Case study: Gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Aquacultural Engineering*, vol. 98, 2022, p. 102263. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102263>.
- [4] Love, R.H. Dorsal-aspect target strength of an individual fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49(3B), 1971, pp. 816–823. <https://doi.org/10.1121/1.1912422>.
- [5] Jech, J.M. et al., Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138(6), 2015, pp. 3742–3764. <https://doi.org/10.1121/1.4937607>.
- [6] Macaulay, G.J.; Peña, H.; Fässler, S.M.M.; Pedersen, G.; Ona, E. Accuracy of the Kirchhoff-Approximation and Kirchhoff-Ray-Mode Fish Swimbladder Acoustic Scattering Models. *PLoS One*, vol. 8(5), 2013, pp. 2–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064055>.
- [7] Foote, K.G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* 82 (3), 1987, pp. 981–987. <https://doi.org/10.1121/1.395298>.

- [8] Furusawa, M. Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *J. Acoust. Soc. Jpn*, (E) 9 (1), 1988, pp. 13–24. <https://doi.org/10.1250/ast.9.13>
- [9] Li, D.; Hao, Y.; Duan, Y. Nonintrusive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review. *Rev. Aqua*, vol. 12 (3), 2020, pp. 1390–1411. <https://doi.org/10.1111/raq.12388>.
- [10] Javanaud, C. Applications of ultrasound to food systems. *Ultrasonics*, vol. 26(3), 1988, pp. 117–123. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(88\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(88)90001-7).
- [11] McClements, D.J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing, *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 6(9), 1995, pp. 293–299. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89139-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89139-6).
- [12] McClements, D.J. Ultrasonic Characterization of Foods and Drinks: Principles, Methods, and Applications, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 37(1), 1997, pp. 1–46. <https://doi.org/10.1080/10408399709527766>.
- [13] McClements, D.J.; Povey, M.J.W. Ultrasonic velocity measurements in some liquid triglycerides and vegetable oils, *Journal American Oil Chemists' Society*, vol. 65(11), 1988, pp. 1787–1790. <https://doi.org/10.1007/BF02542383>.
- [14] Povey, M.J.W; McClements, D.J. Ultrasonics in food engineering. Part I: Introduction and experimental methods. *J. Food Eng.*, vol. 8(4), 1988, pp. 217–245. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(88\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0260-8774(88)90015-5).
- [15] Puig-Pons, V. et al., Estimation of Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) mean length in sea cages by acoustical means. *Applied Acoustics*, vol. 197(1089602), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108960>.
- [16] Simmonds, J.; MacLennan, D. *Fisheries Acoustics*. Theory and Practice. Blackwell. Science, Oxford, 2005.
- [17] Gaunard, G.C. Sonar cross sections of bodies partially insonified by finite sound beams, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol 10(3), 1985, pp. 213–230. <https://doi.org/10.1109/JOE.1985.1145097>.
- [18] Pérez-Arjona, I.; Godinho, L.; Espinosa, V. Influence of fish backbone model geometrical features on the numerical target strength of swimbladdered fish, *ICES J. Mar. Sci.*, vol. 77(7–8), 2020, pp. 2870–2881, 2020. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa160>.
- [19] Pérez-Arjona, I.; Godinho, L.M.C.; Espinosa, V. Numerical simulation of target strength measurements from near to far field of fish using the method of fundamental solutions, *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 104(1), 2018, pp. 25–38. <https://doi.org/10.3813/AAA.919142>.
- [20] Pérez-Arjona, I.; Godinho, L.M.C.; Espinosa, V. Application of the numerical method of fundamental solutions for fish target strength estimation, *EuroRegio2016 9 Congr. Ibérico Acústica 47o Congr. Español Acústica - TECNIACUSTICA*, 2016, pp. 1–8, 2016.
- [21] Peña, H.; Foote, K.G. Modelling the target strength of *Trachurus symmetricus murphyi* based on high resolution swimbladder morphometry using an MRI scanner, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 65, 2008, pp. 1751–1761. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn190>.
- [22] Boswell, K.M.; Pedersen, G.; Taylor, J.C.; LaBua, S.; Patterson III, W.F. Examining the relationship between morphological variation and modeled broadband scattering responses of reef associated fishes from the southeast United States. *Fisheries Research*, vol. 228, 2020, 105590. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105590>.
- [23] Ceballos-Francisco, D.; Carrillo, N.G.; Pardo-Fernández, F.J; Cuesta, A.; Esteban, M. Radiological characterization of gilthead seabream (*sparus aurata*) by X-ray computed tomography, *Journal of Fish Biology*, vol. 97(5), 2020, pp. 1440–1447. <https://doi.org/10.1111/jfb.14510>.
- [24] Simrad, E., 2008. Scientific echo sounder. Reference Manual. Release, 2, 16–48. <https://epic.awi.de/id/eprint/29658/1/Sim2008a.pdf>. (accedido Sep. 28, 2022).