

ACOPLAMIENTO ENTRE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y EL MÉTODO DE LAS SOLUCIONES FUNDAMENTALES PARA EL CÁLCULO NUMÉRICO DEL TARGET STRENGTH

A. Ladino¹, I. Pérez¹, L. Godinho², V. Espinosa¹

¹ Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC) Universidad Politécnica de Valencia
{anlave@doctor.upv.es, iparjona@upv.es, vespinos@upv.es}

² ISE, Dep. Eng. Civil, Universidade de Coimbra
{lgodinho@dec.uc.pt }

Resumen

Con el fin de obtener protocolos de medida y desarrollar algoritmos que determinen las características de la dispersión acústica de los peces, para su control, monitorización e identificación, las simulaciones numéricas son necesarias. En este trabajo, se presenta una metodología para realizar el cálculo del factor de blanco o TS (Target Strength) de un ejemplar de atún rojo (*Thunnus thynnus*) a partir de una tomografía axial computarizada (TAC), acoplando el método de elementos finitos y el método de las soluciones fundamentales. Se consigue reducir el coste computacional para estudiar la evolución del campo acústico en función de la distancia y la frecuencia. Se valida las simulaciones numéricas con medidas experimentales observando similitud en los resultados del TS medio.

Palabras clave: FEM, MFS, acoplamiento, target strengt, acústica submarina.

Abstract

In orden to obtain measurement protocols and develop algorithms that determine the characteristics of the acoustic dispersion of fish, for their control, monitoring and identification, numerical simulation are necessary. In this paper, a methodology for calculating the Target Strength of a bluefin tuna (*Thunnys thynnus*) from a computerized axial tomography (CT) is presented, coupling the finite element method and the method of fundamental solutions. It is possible to reduce the computational cost to study the evolution of the acoustic field as a function of distance and frequency. The numerical simulations are validated with experimental measurements, observing similarity in the results of the mean TS.

Keywords: FEM, MFS, coupling, target strength, underwater acoustics.

PACS n°. 43.30.k, 43.40.Bp

1 Introducción

El factor de blanco o Target Strength (TS) de un objeto definido como la razón entre la intensidad enviada de vuelta al emisor y la que incide sobre el objeto, es un parámetro fundamental que caracteriza un objeto en los estudios de acústica submarina activa. El el caso de las aplicaciones a pesquería y acuicultura tiene utilidad para identificar una especie o para caracterizar sus propiedades, y depende del tamaño, de la orientación de los peces, de la profundidad y de factores morfológicos y biológicos. Para la estimación del TS, se usan tres métodos complementarios: mediciones in situ, con técnicas ex situ midiendo peces vivos o muertos y modelando numéricamente el campo retrodispersado por las estructuras anatómicas del pez [1].

La elección de un método numérico para el estudio de la retrodispersión acústica en los peces depende de varios aspectos como el tamaño y geometría de la especie, el ángulo y frecuencia de insonificación,

la distancia de análisis, la directividad y las dimensiones del haz acústico. Existen varios modelos de dispersión acústica que se han utilizado en los últimos años, cada uno con ventajas y desventajas. Diversos autores han cotemplado el uso de estas heramientas para el caso de peces con vejiga natatoria, como por ejemplo el método de T-matriz [2], modelos de dispersión basados en cilindros[3]–[5], el Kirchhoff -Aproximation (KA) [6], el Kirchhoff-Ray-Mode (KRM) [7], el modelo analítico basado en una expansión modal de un esferoide prolado[8], el método de Fourier (FMM) [9], el método de elementos finitos (FEM)[10], el método de elementos de contorno (BEM) [11] y el método de las soluciones fundamentales (MFS) [12], donde estos últimos han demostrado ser eficientes para la resolución de problemas en acústica [13]–[19].

Las ecosondas científicas utilizan altas frecuencias de trabajo (18-700 KHz). Estas altas frecuencias limitan el cálculo numérico del TS con suficiente precisión, en métodos con malla, ya que se requieren de mallados finos para propagar la onda acústica en el espacio de trabajo, generando altos tiempos de cálculo computacional, restricción en la distancia de propagación y en casos de grandes geometrías no son posibles resolverlos. Esta limitación es crítica cuando se trabaja a distancias cortas entre el pez y el transductor, como ocurre en las medidas en jaulas de acuicultura, se debe tener en cuenta las variaciones del campo acústico en el campo cercano del pez y no se pueden realizar aproximaciones para obtener el campo retrodispersado en campo lejano [20]. Esto ha generado una necesidad de ampliar nuevas técnicas o metodologías de simulación que permitan interpretar los datos procedentes de las ecosondas en esta situación experimental. En este documento, se propone una metodología para calcular el factor de blanco acoplando dos métodos de simulación (FEM+MFS), en una primera parte usando el método de elementos finitos para modelar los detalles anatómicos de la especie de interés y en una segunda parte, acoplando estos resultados al método sin malla de las soluciones fundamentales.

2 Métodos y materiales

A continuación, se describen los fundamentos teóricos de los métodos de simulación:

2.1 Método de elementos finitos (FEM)

A partir de la ecuación de onda que describe los fenómenos acústicos (1):

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0 \quad (1)$$

donde t [s] es el tiempo, ρ_0 [kg/m³] la densidad del fluido y c [m/s] la velocidad del sonido. La ecuación de onda se puede resolver en el dominio de la frecuencia, en (2) se representa la solución armónica:

$$p(x, t) = p(x) \sin (wt) \quad (2)$$

donde se divide la componente espacial $p(x)$ es y la componente temporal $\sin (wt)$. La presión puede escribirse de forma más general usando variables complejas como se muestra en (3):

$$p(x, t) = p(x) e^{iwt} \quad (3)$$

donde el valor físico real instantáneo de la presión es la parte real. Usando esta suposición para el campo de presión, FEM resuelve la ecuación de onda dependiente del tiempo conocida como la ecuación de Helmholtz, definida en (4):

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (4)$$

donde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ para el caso de un problema 3D, $[Pa]$ es la presión acústica, $k = w/c$ el número de onda, $w = 2\pi f$ la frecuencia angular, $f[Hz]$ la frecuencia y c [m/s] la velocidad de propagación acústica del medio.

2.2 Método de las soluciones fundamentales (MFS)

El concepto general del método es una técnica de simulación sin malla, que no utiliza discretización en los elementos sino que utiliza puntos de colocación en el contorno donde se imponen las condiciones de frontera. Su concepto se basa en reproducir el campo a través de la combinación lineal en un conjunto de fuentes virtuales, ubicadas fuera del dominio de interés como se muestra en la Figura 1.

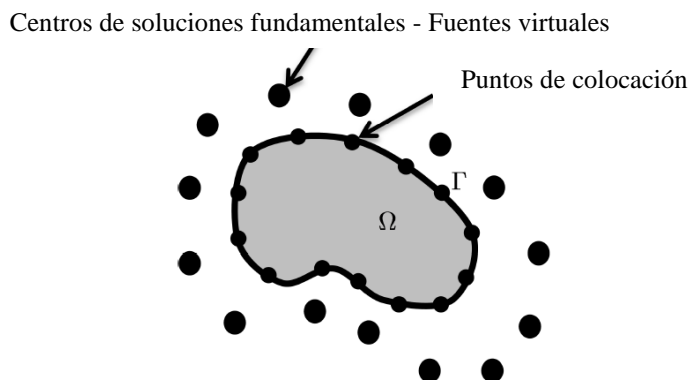


Figura 1 – Ejemplo de representación de la distribución de los puntos de colocación sobre la frontera e igual número de fuentes virtuales. Fuente: [21].

Basado en estos puntos y haciendo uso de la combinación lineal de las soluciones fundamentales de la ecuación diferencial que gobierna el problema, el método permite obtener una aproximación que satisface a dicha ecuación [22]. Estudios numéricos sobre la estabilidad y precisión del método [23]–[25], han demostrado que la formulación matemática y su alta precisión puede dar como resultado un ahorro para los recursos computacionales. Autores como [26], han evidenciado que el MFS puede tener limitaciones cuando se aplica a geometrías complejas, pudiendo no ser capaz de reproducir el campo acústico, motivo de implementar el acoplamiento entre ambos métodos.

Para un medio acústico, infinito y homogéneo, el espacio se puede representar matemáticamente en la frecuencia de dominio como ya se ha mencionado por la ecuación diferencial parcial de Helmholtz. Para el caso de un problema 3D, la solución fundamental G para la presión acústica y H para la velocidad de partícula, en un punto x con coordenadas [m], se puede describir de la forma:

$$G(x, x_0, k) = \frac{e^{-ikr}}{r} \quad (5)$$

Y su derivada en la dirección normal a la frontera:

$$H(x, x_0, k, \vec{n}) = \frac{1}{-i\rho\omega} \frac{(-ikr-1)e^{-ikr}}{r^2} \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \quad (6)$$

En las ecuaciones (5) y (6) $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$, \vec{n} representa la dirección a lo largo de la cual se calcula la velocidad de partícula y ρ la densidad del medio de propagación.

Al aplicar la ecuación diferencial parcial que gobierna el problema en un dominio cerrado, el cual está formado por un límite de frontera, además de satisfacer la ecuación dentro del dominio, también hay que cumplir las condiciones de frontera, las cuales pueden ser de diferentes tipos como se representa en la Tabla 1. Para cada punto de colocación, se impone una determina condición de frontera, las cuales relacionan la presión acústica y la componente normal de la velocidad de partícula.

Tabla 1 – Condiciones de frontera de la ecuación de Helmholtz.

Condición de Dirichlet	$p(x_i, k) = k_D$ para $x_i \in \Gamma$
Condición de Neumann	$\frac{\partial p}{\partial \vec{n}}(x_i, k) = k_N$ para $x_i \in \Gamma$
Condición de Robin	$B_1 p(x_i, k) + \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}(x_i, k) = k_N$ para $x_i \in \Gamma$

Así mismo, con estas condiciones de frontera, las soluciones fundamentales no son suficientes para definir una buena aproximación a la solución del problema, por lo que es necesario establecer condiciones adicionales para este proceso. Cualquier conjunto de soluciones fundamentales, con sus centros externos, satisface la ecuación diferencial parcial en todo el dominio, lo que puede servir como base para definir una estrategia de solución. Se considera la presencia de N puntos distribuidos a lo largo de la frontera llamados puntos de colocación y el mismo número N de soluciones fundamentales centradas fuera del dominio. Para determinar las amplitudes de las fuentes virtuales, en cada punto de frontera en los puntos de colocación se impone una determinada condición de frontera dando origen a un sistema del tipo (7) de N ecuaciones para N incógnitas, el cual puede resolverse para obtener las incógnitas $\{A_i\}_{i=1\dots N}$:

$$MA = B \quad (7)$$

donde A es el vector de las incógnitas, M la matriz del sistema y B es el término independiente, con las condiciones de frontera. En la Tabla 2, se muestra un sistema de ecuaciones obtenidas para cada condición de frontera.

Tabla 2 – Sistema de ecuaciones para las condiciones de frontera.

Condición de Dirichlet	$p(x_i, k) = k_D$ $\sum_{k=1}^N [a_k G(x_i, x_{v,k})] + A_s G(x_i, x_s) = k_D$
Condición de Neumann	$\frac{\partial p}{\partial \vec{n}}(x_i, k) = k_N$ $\sum_{k=1}^N [a_k H(x_i, x_{v,k}, \vec{n})] + A_s G(x_i, x_s, \vec{n}) = k_N$
Condición de Robin	$B_1 p(x_i, k) + \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}(x_i, k) = k_N$ $B_1 \left(\sum_{k=1}^N [a_k H(x_i, x_{v,k})] + A_s G(x_i, x_s) \right) +$ $B_2 \left(\sum_{k=1}^N [a_k H(x_i, x_{v,k}, \vec{n})] + A_s H(x_i, x_s, \vec{n}) \right) = k_N$

Debido al hecho de que la aproximación es generada por un conjunto de soluciones fundamentales con centros fuera del dominio de análisis, es común designar éstas N soluciones fundamentales como “fuentes virtuales”, ya que funcionan en el modelo como puntos emisores, pero fuera del dominio.

2.3 Ventajas y limitaciones FEM y MSF

En la Tabla 3, se describen algunas características sobre las ventajas y desventajas de los dos modelos de simulación acústica empleados para el cálculo numérico de la retrodispersión acústica en especies marinas.

Tabla 3 – Ventajas y desventajas del MFS y FEM

Modelo	Ventajas	Desventajas
MFS	<ul style="list-style-type: none"> - Técnica sin malla, que no requiere ni dominio ni discretización de límites, por lo tanto, presenta un bajo coste computacional. - En algunos casos, con geometrías simples, el método es muy riguroso y se logran obtener mejores resultados que con los métodos convencionales. - Al utilizar soluciones analíticas, permite resolver el cálculo del campo retrodispersado a cualquier distancia y a frecuencias más altas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta dificultades para proporcionar soluciones rigurosas con geometrías complejas o con discontinuidades geométricas. - Así mismo, si las condiciones de frontera presentan discontinuidades, obtener una aproximación utilizando las soluciones fundamentales dentro del dominio de análisis, se convierte en una difícil tarea. - La ubicación de las fuentes virtuales, influye significativamente en la precisión de la respuesta obtenida.
FEM	<ul style="list-style-type: none"> - En modelos con geometrías y estructuras complejas, el método permite realizar el cálculo del campo retrodispersado con alta precisión. - Permite la interacción de diferentes físicas en un mismo estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Método con malla, requiere discretizar todo el dominio de análisis. En altas frecuencias de insonificación aumenta la densidad de malla necesaria, en problemas 3D y la propagación a largas distancias, presenta un alto coste computacional, en algunos casos irresolubles. - Precisión reducida para dispersores débiles.

De acuerdo con lo anterior, se propone como objetivo fundamental para el acoplamiento numérico (FEM+MFS) obtener las ventajas de cada método, generando una herramienta que permita calcular el campo retrodispersado de modelos de especies marinas con geometrías complejas más realistas, a largas distancias de análisis y a frecuencias más altas de insonificación con un bajo coste computacional.

2.4 Acoplamiento FEM+MFS

Para el acoplamiento entre los métodos, como se puede ver en la Figura 2, se realiza una prueba de calibración con un modelo de dispersión acústica de una esfera de aire en FEM. Se ha utilizado el software Comsol Multiphysics 5.5 con el módulo de acústica en el dominio de la frecuencia y en régimen armónico, debido a que la onda acústica incide en el cuerpo y como consecuencia crea una onda dispersa. Como condición de contorno para evitar reflexiones indeseadas se ha colocado una capa de absorción artificial PML (Perfectly Matched Layers), radiación de onda plana como fuente de propagación del haz de ultrasonido y un tamaño de malla tetraédrico $\lambda/10$ de acuerdo a lo mencionado en [27]. La salida del modelo se ha configurado para obtener el valor del TS en función de la frecuencia y el ángulo. Se exportan los valores de las presiones reales e imaginarias incidentes y dispersadas de la frontera del campo exterior, para luego ser las variables de entrada en MFS. Se ha utilizado el software Matlab R2020a para implementar el algoritmo de MFS. Obteniendo estos valores, se consideran como puntos de colocación, se determinan las fuentes virtuales y se resuelve la solución para el problema en 3D.

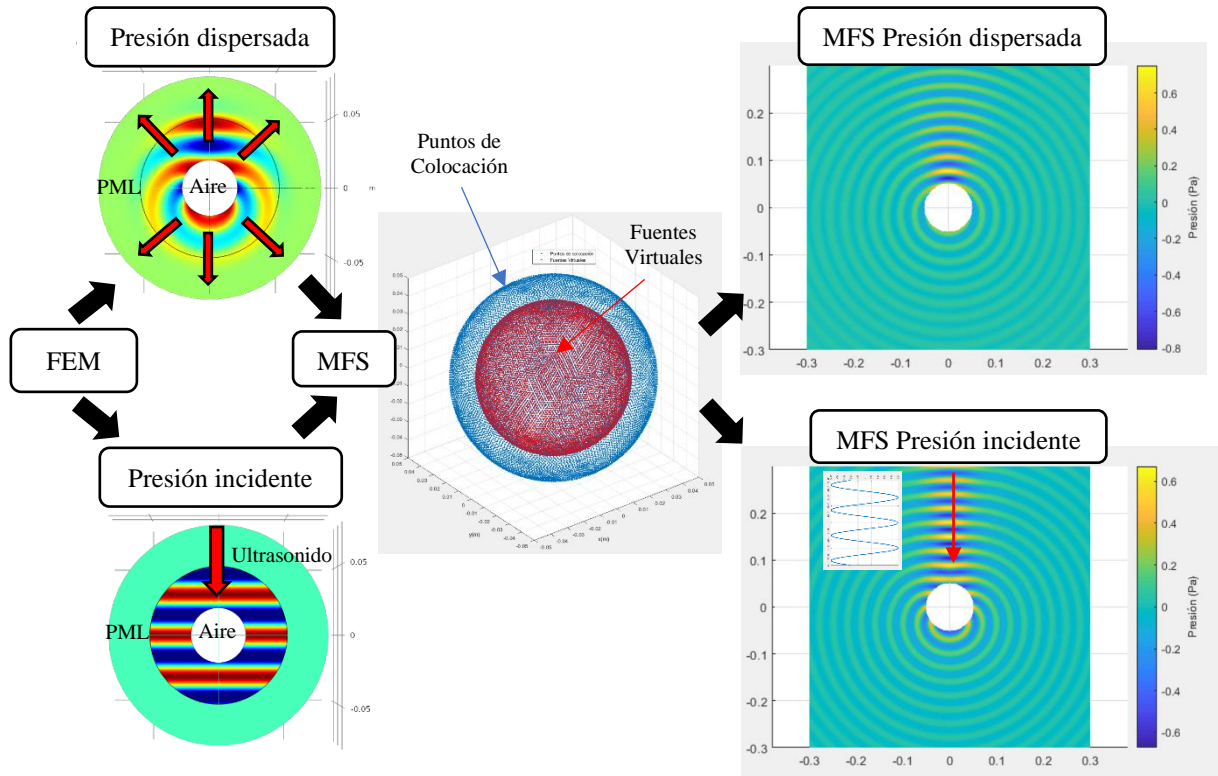
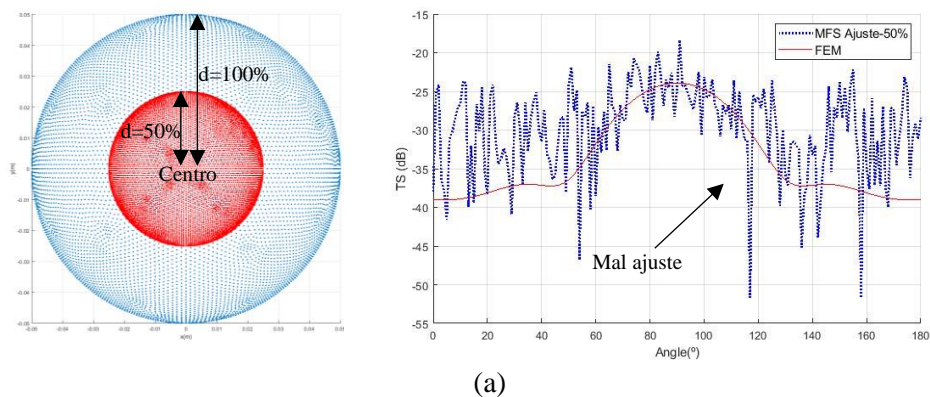


Figura 2 – Acoplamiento numérico (FEM+MFS).

Unas de las limitaciones del MFS, son las distancias de las fuentes virtuales, ya que si están muy alejadas pueden provocar fluctuaciones en la respuesta y si están muy cerca las consecuencias es un sistema mal acondicionado, por lo que la solución del problema no sería coherente. Para evitar esto en el acoplamiento (FEM+MFS), se realiza una prueba de ajuste teniendo como referencia los resultados de FEM. Considerando que la distancia desde el centro del dominio al límite de frontera es el 100%, en la Figura 3 se puede observar que se obtiene un mal comportamiento con fluctuaciones en la dispersión acústica al variar las distancias de las fuentes al 50% y 75%, como también un sistema mal acondicionado al 99% de la frontera. Sin embargo, realizando un ajuste al 85%, el resultado converge y se calibra teniendo la misma respuesta que el modelo en FEM. En la Figura 4, se presenta a modo de ejemplo la validación del ajuste para una frecuencia de insonificación mínima de 18 KHz y una máxima de 120 KHz.



(a)

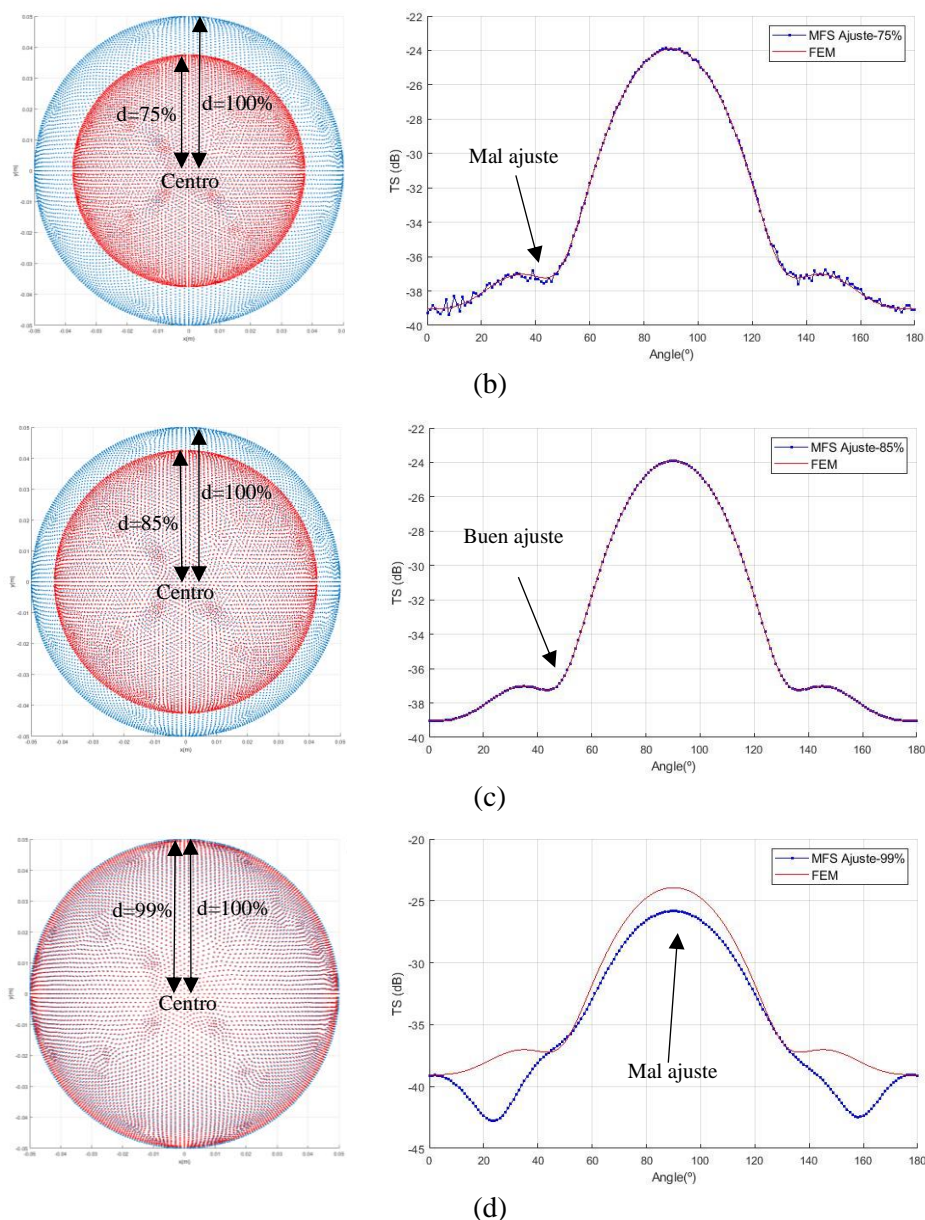


Figura 3 – Ajuste de las fuentes virtuales en el modelo MFS: (a) 50%, (b), 75%, (c) 85% y (d) 99%.

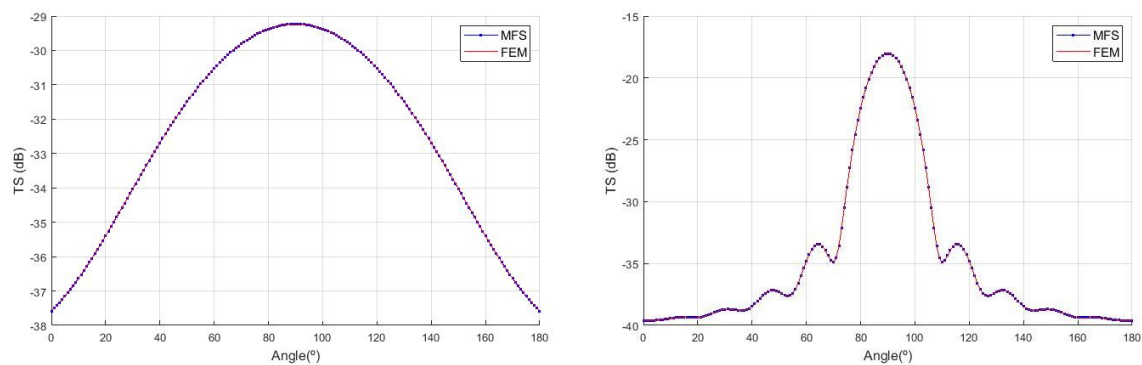


Figura 4 – Validación del ajuste de las fuentes virtuales al 85% para frecuencias de trabajo de 18 y 120 KHz.

2.5 Caso de estudio: Thunnus thynnus

Una vez comprobado el acoplamiento, se propone realizar el cálculo numérico del TS medio en una geometría real de atún rojo, su nombre en inglés Atlantic bluefin tuna (ABFT) y su código FAO BFT. Es un pez de esqueleto regularmente osificado (Ver Figura 5 (a)), de cabeza larga y de hocico corto. Las

mandíbulas tienen dientes pequeños y de forma cónica, su dorso es de color azul oscuro y el vientre plateado. Para realizar el modelo en 3D de la especie, se ha realizado una tomografía axial computarizada (TAC) de un ejemplar congelado (Ver Figura 5 (b)).



Figura 5 – Atún rojo (ABFT) :(a) Registro fotográfico. Fuente: [28], (b) Tomografía axial computarizada (TAC).

En la Figura 6, se muestra el procesado de imagen del TAC realizado en el software Aliza, donde se ha discriminado por segmentos las diferentes estructuras anatómicas de la especie, se ajusta el mallado en el software Autocad 2020 y se exportan a FEM en archivos de tipo *.stl*. En la parte (a) se puede ver el modelo isométrico, en la parte (b) la vista dorsal y ventral, en la parte (c) la vista frontal y en la (d) la vista lateral con la identificación de la vejiga natatoria y el hueso. El individuo tiene unas dimensiones aproximadas de 128 cm de largo, 23.16 cm de ancho y 33.01 cm de alto. La vejiga natatoria tiene unas dimensiones de 13.8 cm de largo, 5 cm de ancho y 5.13 cm de alto. El hueso 104 cm de largo y un diámetro de 2.9 cm. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la simulación acústica y de la directividad de la vejiga natatoria desde la vista ventral.

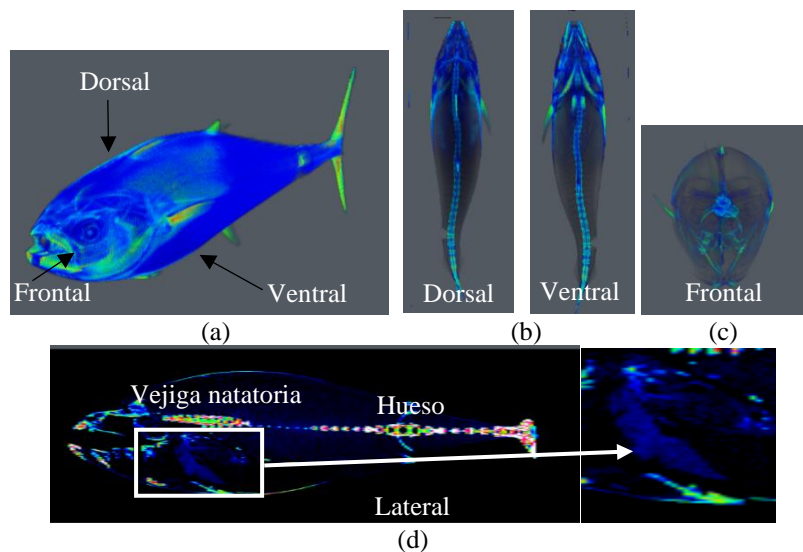


Figura 6 – Modelo del ABFT: (a) Vista en 3D, (b) Vista dorsal y ventral, (c) Vista frontal y (d) Vista en corte lateral con la visualización del hueso y la vejiga natatoria.

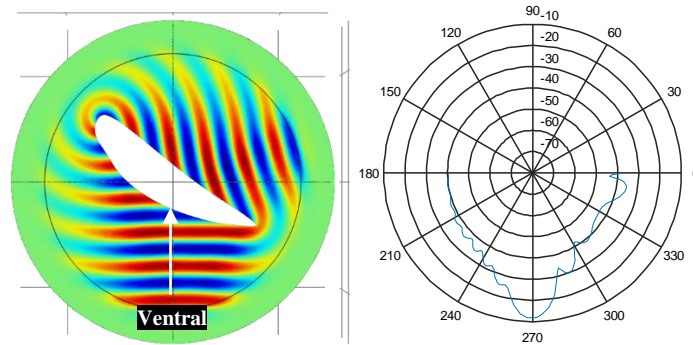


Figura 7 – Ejemplo de la simulación acústica y directividad $D(\theta)$ de la vejiga natatoria del ABFT para una frecuencia de 50 KHz desde la vista ventral (-90°).

Para estudiar el comportamiento de las simulaciones numéricas, se han analizado los valores del TS medio en función de la frecuencia y la longitud de diferentes tamaños de vejiga natatoria, el TS se ha calculado considerando $\pm 5^\circ$ a lo largo de la dirección de la retrodispersión 90° denominado como $TS_{med(90,5)}$.

Por otra parte, se ha realizado una validación de comparación con datos de captura de medidas experimentales realizadas en los tanques A y B del ICAR (Instituto para el Cultivo del Atún Rojo) en las instalaciones del IEO (Instituto Español de Oceanografía) en Mazarrón. Las medidas fueron realizadas con una ecosonda científica EK80 de Simrad trabajando con un transductor split-beam de 120 KHz. Para dicha validación, se ha calculado el TS ponderado en función de medidas *in situ* de las distribuciones de inclinaciones de nado, con la finalidad de conocer la sección máxima de TS dependiente de la orientación del pez y del haz acústico. En la Figura 8 (a), se representa un ejemplo de la distribución gaussiana para una talla de ABFT de 53.2 cm, se puede observar la función de densidad de probabilidad (Probability Density Function-PDF) que puede tener un pez con determinada inclinación, con una media de 1.52° y una desviación estándar de 5.42° . En este caso, se obtiene que el valor máximo de TS se encuentra entre $\pm 23^\circ$ teniendo como referencia la horizontal del pez. Por lo tanto, la inclinación del pez se ha variado de $\alpha = +90^\circ$ a $\alpha = -90^\circ$ con intervalos de 1 grado para dicho rango y 5 grados para los restantes (ver Figura 8 (b)).

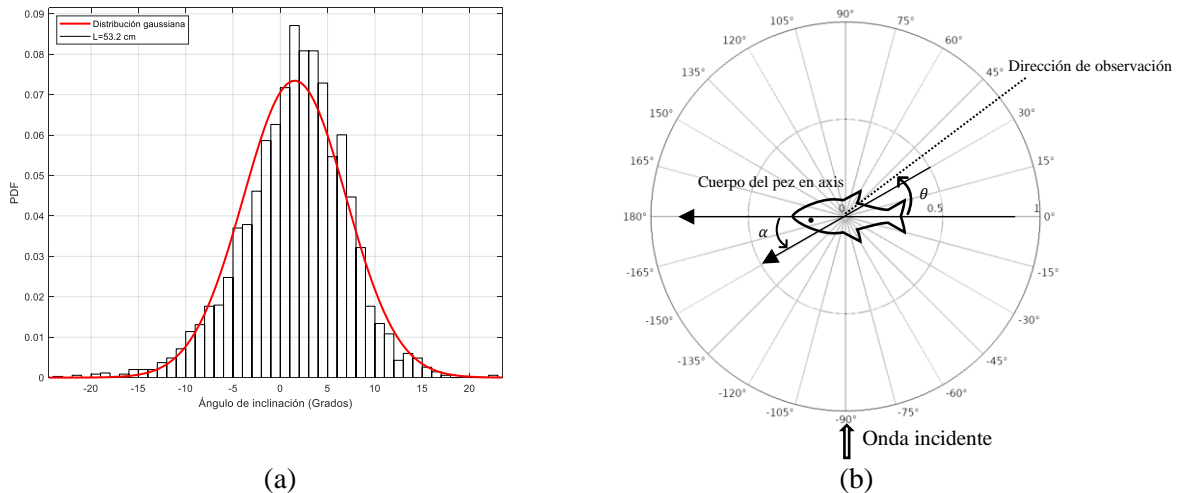


Figura 8 – (a) Histograma del ángulo de inclinación PDF para una talla de 53.2 cm. (b) Esquema del cálculo del TS ponderada, siendo θ el ángulo de observación: $\theta = 0^\circ$ es la dirección de la cola del pez, $\theta = 180^\circ$ la dirección de la cabeza del pez y $\theta = -90^\circ$ la dirección del haz incidente (centro del transductor de la ecosonda). El eje del cuerpo del pez se muestra en el esquema, siendo α el ángulo de inclinación del eje del cuerpo con respecto a la horizontal.

3 Resultados y discusión

3.1 Simulaciones del TS medio

En la Figura 9, se presentan los resultados las simulaciones acústicas ventrales utilizando el (FEM+MFS) para tamaños de vejiga de un ABFT de 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112 y 128 cm. (Nota: los tamaños se han escalado en función del tamaño original del modelo TAC). Como se esperaba, se puede analizar que el TS medio aumenta en función de la frecuencia de insonificación y que, a su vez, aumenta de acuerdo con el tamaño de la vejiga natatoria.

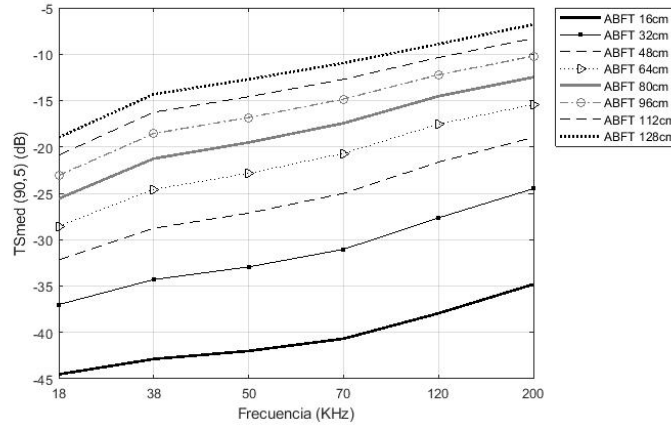


Figura 9 – Valores del $TS_{med(90,5)}$ para diferentes tamaños de vejiga de ABFT

El TS depende de la longitud del pez, como se muestra en la ecuación (8):

$$TS = a \log(L_{cm}) + b \tag{8}$$

donde a es la pendiente, b la ordenada en el origen y L la longitud del pez en cm. Al tener dos variables cuantitativas, una dependiente para el caso del TS y una independiente para $\log(L_{cm})$, se aplica el método estadístico de la regresión lineal con la ecuación de la forma $Y = a + bX$. Esto con el objetivo de verificar la relación existente entre ellas, encontrando una recta que ajuste a la nube de puntos y que pueda ser utilizada para predecir los valores del TS a partir de los de $\log(L_{cm})$.

En la Tabla 4, se presenta los resultados de la ecuación de ajuste entre el TS_{med} y $\log(L_{cm})$ para cada frecuencia, el valor del coeficiente de correlación R^2 , que en todos los casos tiene un buen ajuste y el Valor-P de las pruebas de normalidad de W Shapiro Wilk, donde se plantea la hipótesis: $H0$ los residuos de los datos se distribuyen normalmente y $H1$ los residuos de los datos no se distribuyen normalmente.

El Valor-P de significancia en todas las pruebas realizadas es mayor a 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula $H0$, que los valores de las medidas numéricas (FEM+MFS) provienen de una distribución normalmente con un 95% de confianza.

Tabla 4 – Resultados de las ecuaciones de ajuste de las simulaciones numéricas: TS_{med} VS L .

Frecuencia (KHz)	Ecuación de ajuste	R^2	W Shapiro Wilk Valor-P
18	$TS_{med(90,5)} = 28.41 \log_{10}(L_{cm}) - 79.41$	0.997	0.65
38	$TS_{med(90,5)} = 31.90 \log_{10}(L_{cm}) - 81.90$	0.9983	0.57
50	$TS_{med(90,5)} = 32.75 \log_{10}(L_{cm}) - 81.86$	0.9993	0.51
70	$TS_{med(90,5)} = 33.21 \log_{10}(L_{cm}) - 80.78$	0.9998	0.44
120	$TS_{med(90,5)} = 32.34 \log_{10}(L_{cm}) - 76.42$	0.9983	0.31
200	$TS_{med(90,5)} = 30.87 \log_{10}(L_{cm}) - 71.38$	0.9982	0.34

3.2 Comparativa entre datos acústicos y datos de captura

Con el fin de validar el método (FEM+MFS) con datos de medidas *in situ*, en la Tabla 5 se muestran medidas experimentales ventrales para diferentes tallas de ABFT y en la Tabla 6 el resultado de los ajustes lineales del TS_c compensado obteniendo un coeficiente de correlación R^2 de 0.91.

Tabla 5 – Resultados de las medidas experimentales para $f=120\text{KHz}$.

L(cm)	TS compensado (dB) -120 KHz
53.2	-25.32
66.7	-18.68
81.9	-17.16
100.1	-14.48
106.9	-14.67

Tabla 6 – Resultado de la ecuación de ajuste de las medidas experimentales: TS_c VS L.

Frecuencia (KHz)	Ecuación de ajuste	R^2
120	$TS_c = 33.67 \log_{10}(L_{cm}) - 81.99$	0.91

En este documento, se ha comparado los resultados experimentales de una talla de 53.2 cm y los simulados (FEM+MFS) para una talla de 48 cm a una frecuencia de 120 KHz. Como se mencionó anteriormente, para esta validación se ha proporcionado la función de densidad de probabilidad de la orientación de nado de medidas *in situ* y se ha obtenido el TS ponderado, como se puede observar en la en la Tabla 7 los valores presentan bastante coincidencia.

Tabla 7 – Resultados del TS de las simulaciones numéricas y experimentales para 120 KHz.

(FEM+MFS)		Medidas experimentales	
L(cm)	TS ponderado (dB)	L(cm)	TS compensado (dB)
48	-25.76	53.2	-25.32

3.3 Simulación de la medida del TS VS la distancia del transductor

Una de las ventajas del acoplamiento (FEM+MFS), independiente de la frecuencia, es que permite estudiar la transición del campo cercano al campo lejano, debido a que el método sin malla MFS, sólo tiene como restricción resolver la ecuación (7) y la distancia de propagación del campo acústico no está limitada, lo que genera un ahorro computacional, característica compleja al utilizar sólo FEM. Por ejemplo, en la Figura 10 se muestra la simulación para una talla de 48 cm, donde se puede observar la variación en el comportamiento de la retrodispersión acústica ventral en el campo lejano (1 a 200 metros) para una frecuencia de 120 KHz, habitualmente utilizadas en las medidas experimentales.

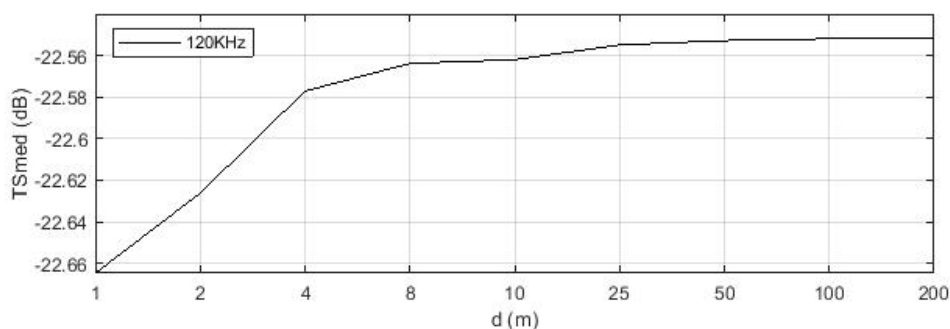


Figura 10 – Valores del TS_{med} para un ABFT de 48cm VS distancia a 120 KHz, para medidas ventrales de insonificación.

4 Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha realizado el acoplamiento y ajuste de dos métodos numéricos (FEM + MFS) para el cálculo del TS en un ejemplar de atún rojo a partir de una tomografía, estimando el TS en función del tamaño de la vejiga natatoria, obteniendo un coeficiente de correlación aproximado de 0.99 en todas las simulaciones acústicas. Las limitaciones que tienen ambos métodos, son resueltas con la metodología propuesta, por lo que se concluye que el acoplamiento (FEM+MFS), es una herramienta eficiente para calcular la retrodispersión acústica en modelos detallados de las estructuras internas de las especies marinas, logrando un ahorro en los recursos computacionales para analizar el TS en función de la distancia y la frecuencia.

Teniendo en cuenta la PDF de las distribuciones de inclinaciones de nado de medidas experimentales, se ha evidenciado que el (FEM+MFS) presenta resultados significativos con los datos de captura. Sin embargo, para trabajos futuros se propone comparar el TS para diferentes tamaños de ejemplares y frecuencias de trabajo.

Considerando la ventaja que tiene el (FEM+MFS) sobre el uso de diferentes físicas acústicas, se propone estudiar el comportamiento del hueso considerándolo la estructura como un sólido a diferentes velocidades de onda transversal. Esto con la finalidad de verificar si existen variaciones del TS en la respuesta polar. Por otra parte, es de interés utilizar ésta herramienta para calcular el TS en función del ángulo de insonificación tanto para medidas laterales como dorsales.

Con el ánimo de optimizar el acoplamiento, se propone ajustar la capa de absorción PML en el modelo de FEM, considerando una condición de radiación esférica con la finalidad de reducir aún más el coste computacional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de las ayudas del Programa de Movilidad para estudiantes de doctorado de la Universidad Politécnica de Valencia para estancias en 2020, al grupo de investigación de acústica submarina del Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC-UPV) y a la colaboración del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidade de Coimbra.

Referencias

- [1] K. G. Foote, «Summary of methods for determining fish target strength at ultrasonic frequencies | ICES Journal of Marine Science | Oxford Academic», *ICES Journal of Marine Science*, 1991. <https://academic.oup.com/icesjms/article-abstract/48/2/211/644496> (accedido may 03, 2020).
- [2] P. C. Waterman, «New Formulation of Acoustic Scattering», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 45, n.º 6, pp. 1417-1429, jun. 1969, doi: 10.1121/1.1911619.
- [3] M. A. Do y A. M. Surti, «Estimation of dorsal aspect target strength of deep-water fish using a simple model of swimbladder backscattering», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, n.º 4, pp. 1588-1596, abr. 1990, doi: 10.1121/1.399406.
- [4] T. K. Stanton, «Sound scattering by cylinders of finite length. III. Deformed cylinders», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, n.º 2, pp. 691-705, ago. 1989, doi: 10.1121/1.398193.
- [5] Z. Ye, «A novel approach to sound scattering by cylinders of finite length», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, n.º 2, pp. 877-884, ago. 1997, doi: 10.1121/1.419910.
- [6] K. G. Foote, «Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 78, n.º 2, pp. 688-700, ago. 1985, doi: 10.1121/1.392438.
- [7] C. S. Clay y J. K. Horne, «Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*)», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 96, n.º 3, pp. 1661-1668, 1994, doi: 10.1121/1.410245.
- [8] M. Furusawa, «Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength», *J. Acoust. Soc. Japan*, vol. 9, n.º 1, pp. 13-24, 1988, doi: 10.1250/ast.9.13.
- [9] D. B. Reeder, T. K. Stanton, y J. M. Jech, «Broadband acoustic backscatter and high-resolution

- morphology of fish: Measurement and modeling», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116, n.º 2, pp. 747-761, 2004, doi: 10.1121/1.1648318.
- [10] J. Lilja, T. J. Marjomäki, J. Jurvelius, T. Rossi, y E. Heikkola, «Simulation and experimental measurement of side-aspect target strength of Atlantic salmon (*Salmo salar*) at high frequency», *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 61, n.º 11, pp. 2227-2236, nov. 2004, doi: 10.1139/F04-166.
- [11] K. G. Foote y D. T. I. Francis, «Comparing Kirchhoff-approximation and boundary-element models for computing gadoid target strengths», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, n.º 4, pp. 1644-1654, abr. 2002, doi: 10.1121/1.1458939.
- [12] I. Pérez-Arjona, L. M. C. Godinho, y V. Espinosa, «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, n.º 1, pp. 25-38, 2018, doi: 10.3813/AAA.919142.
- [13] J. António, A. Tadeu, y L. Godinho, «A three-dimensional acoustics model using the method of fundamental solutions», *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 2008, doi: 10.1016/j.enganabound.2007.10.008.
- [14] E. G. A. Costa, L. Godinho, A. Pereira, y J. A. F. Santiago, «Prediction of acoustic wave propagation in a shallow water configuration using the method of fundamental solutions», *J. Comput. Acoust.*, vol. 20, n.º 4, dic. 2012, doi: 10.1142/S0218396X12500130.
- [15] L. Godinho, P. Amado-Mendes, y A. Pereira, «A hybrid analytical-numerical model based on the method of fundamental solutions for the analysis of sound scattering by buried shell structures», *Math. Probl. Eng.*, vol. 2011, 2011, doi: 10.1155/2011/710623.
- [16] L. Godinho, P. Amado-Mendes, J. Carbajo, y J. Ramis-Soriano, «3D numerical modelling of acoustic horns using the method of fundamental solutions», *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 51, pp. 64-73, 2015, doi: 10.1016/j.enganabound.2014.09.013.
- [17] L. Godinho, A. Tadeu, y P. A. Mendes, «Wave Propagation around Thin Structures using the MFS», 2007.
- [18] M. Martins, L. Godinho, y L. Picado-Santos, «Numerical evaluation of sound attenuation provided by periodic structures», *Arch. Acoust.*, vol. 38, n.º 4, pp. 503-516, 2013, doi: 10.2478/aoa-2013-0060.
- [19] A. Tadeu, J. António, y L. Godinho, «Defining an accurate MFS solution for 2.5D acoustic and elastic wave propagation», *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 33, n.º 12, pp. 1383-1395, 2009, doi: 10.1016/j.enganabound.2009.06.007.
- [20] G. J. Macaulay, H. Peña, S. M. M. Fässler, G. Pedersen, y E. Ona, «Accuracy of the Kirchhoff-Approximation and Kirchhoff-Ray-Mode Fish Swimbladder Acoustic Scattering Models», *PLoS One*, vol. 8, n.º 5, may 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0064055.
- [21] L. M. C. Godinho, «INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS SEM MALHA: O MÉTODO DAS SOLUÇÕES FUNDAMENTAIS», 2012.
- [22] Y. S. Smyrlis, «The method of fundamental solutions: A weighted least-squares approach», *BIT Numer. Math.*, vol. 46, n.º 1, pp. 163-194, 2006, doi: 10.1007/s10543-006-0043-6.
- [23] A. Bogomolny, «FUNDAMENTAL SOLUTIONS METHOD FOR ELLIPTIC BOUNDARY VALUE PROBLEMS.», *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 22, n.º 4, pp. 644-669, 1985, doi: 10.1137/0722040.
- [24] M. Katsurada y H. Okamoto, «A mathematical study of the charge simulation method. {I}», *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo Sect. IA Math.*, vol. 35, n.º 3, pp. 507-518, 1988.
- [25] Y. S. Smyrlis y A. Karageorghis, «Numerical Analysis of the MFS for Certain Harmonic Problems», *ESAIM Math. Model. Numer. Anal.*, vol. 38, pp. 495-517, 2003, doi: 10.1051/m2an:2004023.
- [26] L. M. C. Godinho, E. G. A. Costa, A. S. C. Pereira, y J. A. F. Santiago, «Some observations on the behavior of the method of fundamental solutions in 3D acoustic problems», *Int. J. Comput. Methods*, vol. 9, n.º 4, dic. 2012, doi: 10.1142/S0219876212500491.
- [27] T. Forland, H. Hobaek, E. Ona, y R. J. Korneliussen, «Broad bandwidth acoustic backscattering from sandeel - measurements and finite element simulations», *ICES J. Mar. Sci.*, vol. 71(7), n.º 5699, pp. 1894-1903, 2014, doi: 10.1093/icesjms/fsu010 Original.
- [28] Conxemar, «Atún rojo | Asociación Conxemar», *Atún rojo*, 2020. <https://www.conxemar.com/es/atun-rojo> (accedido may 07, 2020).