



CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y SÍSMICAS RADIADAS POR CRUCEROS EN EL MAR MEDITERRÁNEO

Esther Moya de Rivas¹
Francisco Javier Rodrigo Saura¹
Antonio Sánchez García¹
Pablo Cervantes Fructuoso¹

¹ Sociedad Anónima de Electrónica Submarina S., M., E. Crta. Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España

RESUMEN

Las actividades antropogénicas en el medio marino están generando un continuo crecimiento de la contaminación en el entorno marino relacionada con diferentes tipos de energía radiada. El tráfico de cruceros se configura en la actualidad como una de las actividades de mayor crecimiento, especialmente en entornos como el Mar Mediterráneo. Partiendo de estas premisas, esta investigación tiene como principal objetivo avanzar en el conocimiento de las principales características de las radiaciones acústicas y sísmicas emitidas por los cruceros en el Mar Mediterráneo. A partir de un conjunto de medidas realizadas con el sistema de medida MIRS (Multi-Influence Range System) se extraen diferentes características de ambos tipos de radiaciones. En particular, el estudio incluye un análisis de la correlación entre las características acústicas y sísmicas centrado en mostrar su comunalidad a pesar de sus diferentes características de propagación submarina. Señalar que los resultados del estudio muestran un incremento muy significativo en los niveles de energía acústica y sísmica en el entorno submarino con relación al nivel de ruido ambiente como consecuencia del tráfico de cruceros.

ABSTRACT

Anthropogenic activities in the marine environment are generating a continuous growth in the pollution related with different kinds of radiated energy. The cruise ships traffic is configured nowadays as one of the activities of most rapid growth, especially in environments as the Mediterranean Sea. Starting from these premises, this research has as its main objective to advance in the knowledge of the main characteristics of the acoustic and additionally the seismic radiations emitted by cruise ships in the Mediterranean Sea. Different characteristics of both types of radiations are drawn from a set of measurements performed with measurement system Multi-Influence Range System (MIRS). In particular, the study includes an analysis of the correlation between acoustic and seismic characteristics centered on showing common ones, in spite of their different underwater propagation features. To point out that the results of the study

show a very significant increment in the level of acoustic and seismic energies in the underwater environment in relation to the ambient noise level, as a consequence of the cruise ships traffic.

Palabras Clave— Radiación Acústica, Radiación Sísmica, Medidas Multi-Influencia, Contaminación Acústica Submarina.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico mundial está generando un nivel creciente de actividades humanas en una amplia variedad de entornos, incluido el submarino. Estas actividades es la fuente de un conjunto de radiaciones de energía que se propagan en el medio submarino, incluyendo, entre otras: acústica, sísmica, eléctrica y magnética.

En Europa, se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008 [1], bajo la denominación de Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [Marine Strategy Framework Directive-MSFD], con el objetivo de establecer un marco de acción comunitaria en el ámbito de la política del medio marino. Esta directiva introdujo la contaminación acústica submarina, como se detalla en el Descriptor 11. La Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2] sobre los criterios y normas metodológicas para el buen estado ambiental (Good Environmental Status GES) de las aguas marinas propuso dos criterios: sonidos impulsivos fuertes, de baja y media frecuencia (C11.1.1) y sonidos continuos de baja frecuencia (C11.2.1). La implementación del Descriptor 11 de la MSFD fue seguida y apoyada por el Subgrupo Técnico de Ruido Submarino de la MSFD (TG Noise), que proporcionó definiciones y recomendaciones detalladas para monitorizar y medir su evolución [3].

La principal fuente de contaminación acústica submarina es el tráfico marítimo [4-8]. El ruido generado por el tráfico marítimo es una combinación de sonidos tonales y ruido de banda ancha repartidos en el rango de frecuencia entre 2 Hz y 100 kHz, y se genera principalmente por la cavitación de la hélice, la maquinaria de a bordo y las turbulencias generadas alrededor del casco [6] y [9].

Las ondas sísmicas son ondas generadas por fuentes de ruido acústico que se propagan por el fondo marino, así pueden ser analizadas simultáneamente con las ondas acústicas como fuente de contaminación marina.

El objetivo de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre la caracterización de los campos acústicos y sísmicos radiados por buques tipo cruceros a través del análisis de un conjunto de medidas realizadas con el sistema de medida Multi-Influencia [Multi-Influence Range System-MIRS], desplegado durante tres años en el área del Puerto de Cartagena.

El artículo se divide en un total de cinco apartados, de los que el primero corresponde a la introducción, el segundo a la descripción del Sistema de Medidas Multi-influencia (MIRS), el tercero a la descripción de la campaña de medidas, el cuarto al análisis de los resultados obtenidos y el quinto a las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDAS MULTI-INFLUENCIA (MIRS)

El sistema de medidas Multi-Influencia MIRS fabricado por la empresa Sociedad Anónima de Electrónica Submarina, S., M., E. (SAES) proporciona mediciones confiables en un escenario controlado de las influencias submarinas acústicas, eléctricas, magnéticas, de presión y sísmicas. En la Figura 1 se muestra el concepto de operación del sistema MIRS.



Figura 1. Sistema de Medidas Multi-Influencia, MIRS. Concepto Operativo.

Los datos medidos por las unidades de sensores submarinos [Underwater Sensors Unit-USU] se transmiten a la estación de control [Range Control Station – RCS] mediante una conexión por cable híbrido. En la Figura 2 se muestra la unidad USU desplegada en el fondo marino. El hidrófono está montado en la parte superior de la unidad, estando localizado a una distancia inferior a 1 metro tal y como requiere el estándar de la OTAN STANAG 1136 [10].

Los datos de posicionamiento recibidos del buque bajo prueba [Vessel Under Test-(VUT)] se muestran en tiempo real en la unidad RCS, además de las posiciones y los datos de rumbo y actitud de la USU. La capacidad de análisis del sistema MIRS incluye procesamiento de señales estáticas y

alternas tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial.



Figura 2. Sensor submarino Multi-Influencia (USU) durante el despliegue (izquierda) y desplegado en el fondo del mar (derecha).

3. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS

3.1. Descripción del área de medidas

El área de medidas está situada en el puerto de Cartagena (Figura 3), situado en la costa sureste de España. La situación geográfica es longitud 0°59' Oeste y latitud 37°35' Norte. El régimen de viento predominante en la zona es Sursuroeste y Sursureste, y su marea máxima es de alrededor de 0,65 m. Esta zona tiene una intensa actividad antropogénica, con un importante tráfico mercante, de pasajeros, pesquero y recreativo. Además, en la zona se encuentra una de las bases navales más destacadas de la Armada Española. Indicar que no se realizaron medidas de buques militares y, por lo tanto, el ruido radiado por este tipo de buques no está incluido en el estudio.



Figura 3. Zona de medidas: Puerto de Cartagena (Mar Mediterráneo). Muelle de Cartagena y Escombreras.

La selección de la posición final de despliegue del sensor se realizó siguiendo dos criterios. En primer lugar, se realizó una preselección de posiciones en base a los criterios de localización del sensor en las zonas con mayor densidad de tráfico marítimo [11]. En segundo lugar, las ubicaciones preseleccionadas se verificaron sobre la base del análisis de la propagación del sonido realizado en el estudio acústico, con el fin de garantizar que el sensor en estas ubicaciones recibiera la energía acústica radiada por los buques de superficie. El procedimiento estándar utilizado para medir

buques de superficie en aguas poco profundas fue el definido en el estándar STANAG 1136 [10].

3.2. Descripción de la campaña de medidas

El proceso de adquisición se controló mediante el sistema de identificación automática [Automatic Identification System-AIS] [12]. Se integró un sistema AIS con el sistema de adquisición MIRS para detectar la presencia de buques transmisores AIS cerca del sensor y, posteriormente, comenzar a tomar medidas y registrar su información.

Una vez que se completó una medida de un buque, se realizó una nueva medida de manera automática cinco minutos después, con el fin de evaluar los niveles acústicos mientras el buque pasaba por encima del sensor y cuando el buque estaba alejado. El sistema registró no solo la información del sensor, sino también la información de los datos AIS recibidos de todos los buques en el alcance del área de medidas. La integración de un sistema AIS para controlar el tiempo de adquisición proporciona grandes ventajas ya que el sistema de adquisición funciona automáticamente sin intervención humana. La información utilizada para cada buque que navegaba en el área de medidas era; el número de identificación del servicio móvil marítimo (MMSI), el tipo de buque, el seguimiento de sus posiciones y el rumbo y la velocidad durante la medida. Sin embargo, el conjunto de datos AIS transmitido desde los buques no siempre está completo y, a veces, carece del nombre y el tipo del buque. Por esta razón, los datos registrados del sistema AIS deben ser procesados posteriormente y, en ocasiones completados.

Las medidas acústicas se realizaron desde septiembre del año 2013 hasta junio del año 2015. Durante los meses de agosto y septiembre del año 2014, el sistema se detuvo y recuperó para realizar tareas de mantenimiento. Por lo tanto, el sensor funcionó durante un total de 20 meses. En el presente trabajo se ha analizado un conjunto de medidas correspondientes a buques tipo crucero y las medidas de ruido ambiente realizadas minutos después del paso del buque sobre el sensor.

3.3. Descripción del proceso de análisis de señal

El análisis se particulariza para las influencias acústicas y sísmicas, pero la influencia eléctrica, magnética y de presión también son registradas de manera simultánea, lo que permitirá futuros análisis. En la Figura 4 se muestra una mediada acústica y sísmica típicas realizadas de un buque tipo crucero.

Con el objetivo de caracterizar las señales acústicas y sísmicas de buques tipo crucero se implementan tres procesamientos: procesamiento de banda ancha en tercios de octava [One Third Octave-OTO], procesamiento en banda estrecha [NarrowBand-NB] y procesamiento de coherencia de modulación cíclica integrada [Integrated Cyclic Modulation Coherence-ICMC].

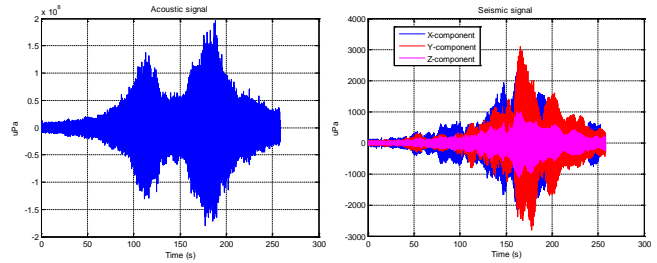


Figura 4. Señal acústica típica (izquierda) y sísmica (derecha) medidas de un buque tipo crucero.

Las magnitudes y unidades acústicas están definidas de acuerdo con las referencias [13-14] y la norma ISO-18405 [15].

El procesamiento de banda ancha se realiza para los tercios de octava definidos de acuerdo con la norma internacional IEC-61260 [16]. Además, se han realizado estudios particularizados para los dos tercios de octava definidos por la Comisión Europea [2], es decir, tercios de octava centrados en 63 y 125 Hz.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El conjunto de datos de medidas acústicas y sísmicas utilizadas para el presente trabajo está compuesto por sesenta (60) registros correspondientes a diferentes cruceros.

4.1. Análisis de resultados obtenidos en banda ancha

En primer lugar, se analiza las salidas del proceso de banda ancha obtenida en términos de tercios de octava. La Figura 5 muestra para cada medida acústica el tercio de octava de energía máxima.

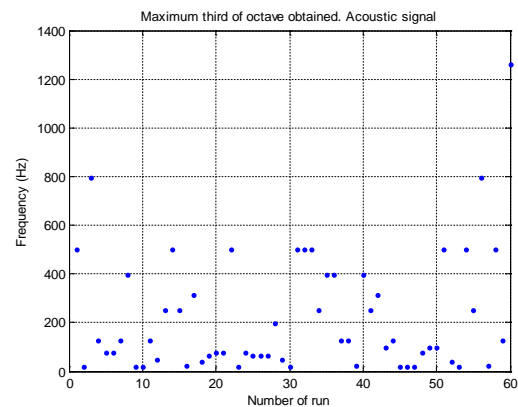


Figura 5. Análisis de Tercios de Octava. Valor de la frecuencia central del tercio de octava de energía máxima para cada medida acústica.

Como se puede observar, para el 62 % de las medidas el tercio de octava de mayor energía se encuentra en la banda < 200 Hz, es decir, banda baja frecuencial. Para el 19 % y 15 %

de las medidas, la frecuencia central del tercio de octava de mayor energía se encuentra en la banda [200 Hz – 400 Hz] y [400 – 600 Hz] respectivamente. Estos resultados muestran que el ruido radiado por cruceros en banda ancha es predominantemente de baja frecuencia estando principalmente distribuido en la banda hasta 500 Hz.

En la Figura 6 se muestra el valor medio de los valores máximos para cada tercio de octava calculado para todas las medidas acústicas y sísmicas correspondientes tanto a buques tipo crucero como ruido ambiente.

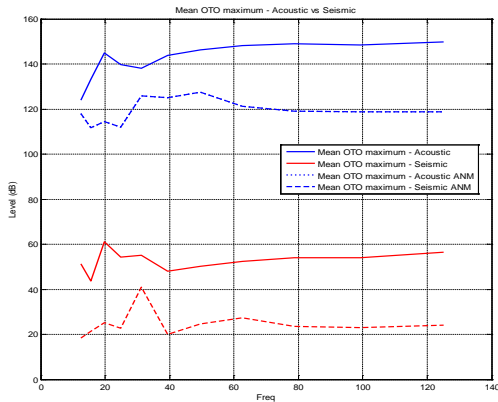


Figura 6. Análisis de Tercios de Octava. Valor medio de los máximos de cada tercio de octava para todas las medidas acústicas y sísmicas correspondientes tanto a buques tipo crucero como ruido ambiente.

La diferencia de nivel de los tercios de las señales sísmicas y acústicas está en torno a 100 dB. Hay una diferencia de 30 dB entre los niveles de los tercios de octava correspondientes a las medidas de buques tipo crucero y medidas de ruido ambiente.

A continuación, se particulariza el análisis para los dos tercios de octava incluidos en la Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2]. En la Figura 7 se muestra los niveles máximos para los tercios de octava centrados en 62.5 Hz y 125 Hz para cada medida acústica y sísmica.

Como se puede observar, los indicadores muestran que ambos tercios de octava tienen valores similares para cada influencia, existiendo unas diferencias entre ellos de hasta 10 dB para cada medida. El nivel medio de los tercios centrados en 62,5 y 125 Hz de todas las medidas es similar para las señales acústicas y sísmicas, existiendo una diferencia de 2 dB y 4 dB respectivamente entre la media de cada nivel de cada de tercio.

En el 55% de las medidas, el nivel del tercio de 125 Hz de las señales acústicas es superior al nivel del tercio de 62,5 Hz. En el análisis de las señales sísmicas, el porcentaje de medidas con nivel del tercio centrado en 125 Hz superior al nivel del tercio centrado en 62,5 z es del 68,33 %.

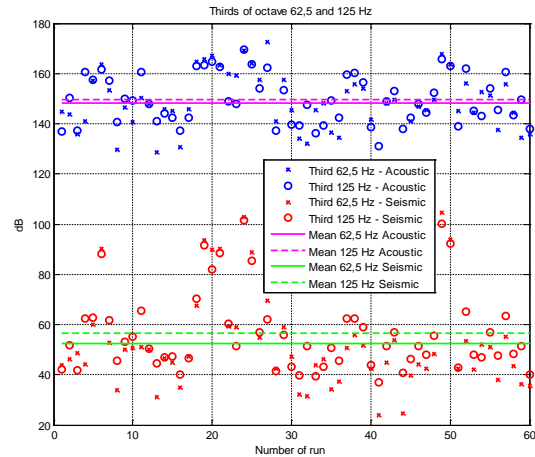


Figura 7. Análisis de Tercios de Octava. Valor máximo de los tercios de octava centrados en 62,5 y 125 Hz.

4.2. Análisis de resultados obtenidos en banda estrecha

El procesamiento de banda estrecha proporciona información sobre los tonos incluidos en la influencia, así como el ancho de banda de interés.

La Figura 8 muestra la frecuencia central del tono de banda estrecha de mayor amplitud. Como se puede observar, existe una correlación entre los tonos máximos detectados en ambas influencias.

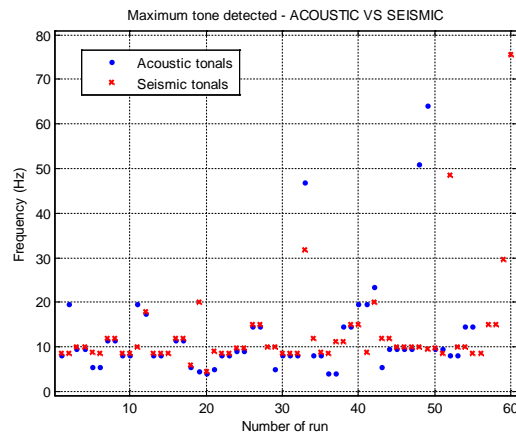


Figura 8. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Frecuencia del tono de Banda Estrecha de mayor amplitud.

En la Figura 9 se muestra la distribución de los tonos de banda estrecha detectados. En las señales acústicas, la mayoría de los tonos se detectan en bajas frecuencias, por debajo de 200 Hz.

En la Figura 10 se muestra la distribución acumulativa de los tonos de banda estrecha detectados en las medidas acústicas. Como se puede observar, el ancho de banda medio de interés de la influencia acústica es aproximadamente de 50

Hz a 745 Hz. Los tonos de frecuencia por encima de 1500 Hz son prácticamente inexistentes.

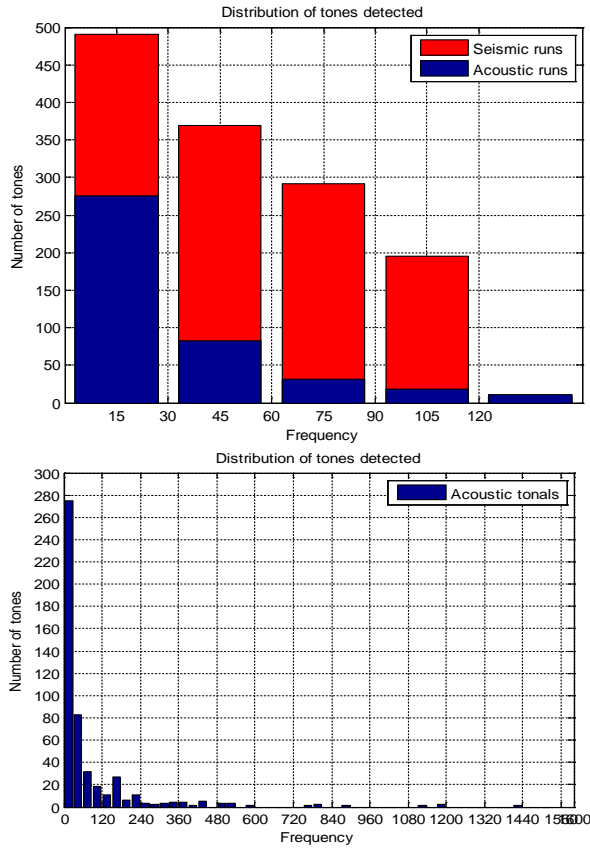


Figura 9. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Número de tonos detectados en baja frecuencia para señales sísmicas y acústicas (arriba). Distribución frecuencial del número de tonos de Banda Estrecha detectados (abajo).

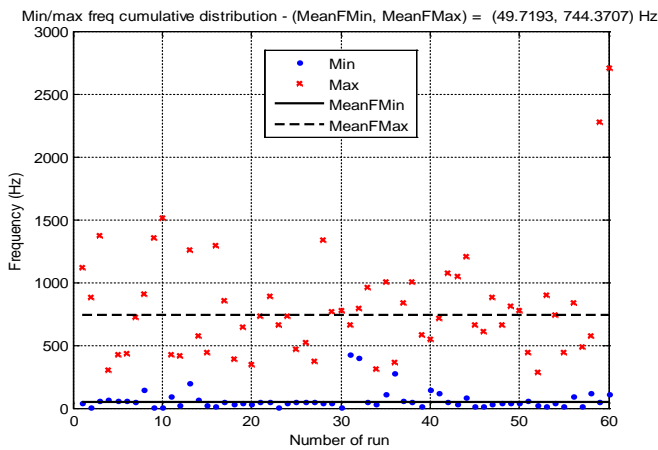


Figura 10. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Frecuencia mínima y máxima de los tonos detectados en Banda estrecha y valores medios.

4.3. Análisis de resultados obtenidos del proceso ICMC

El procesamiento de coherencia de modulación cíclica integrada (ICMC) detecta tonales modulados por el ruido, generado fundamentalmente por la rotación de la hélice. Este proceso se realiza para la influencia acústica.

En la Figura 11 se muestran los tonos ICMC con nivel máximo detectado.

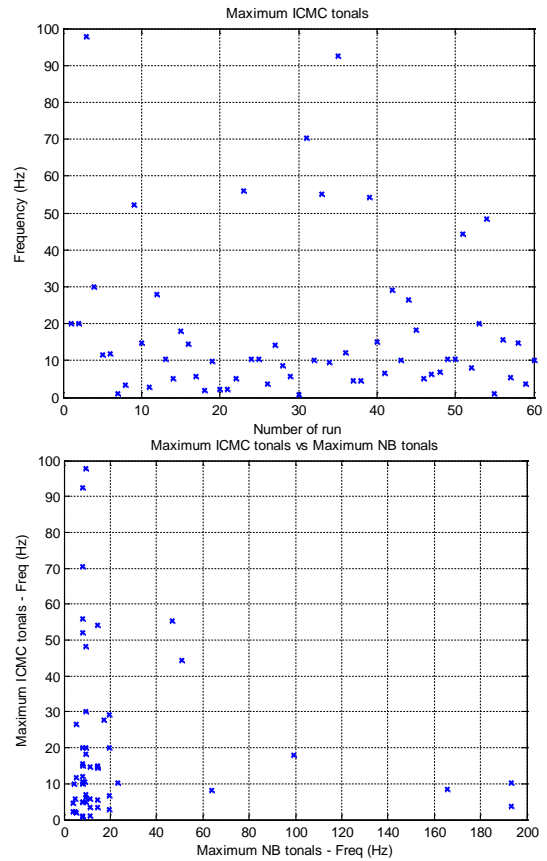


Figura 11. Salida Procesamiento ICMC. Máximos de ICMC (arriba) y Tonales ICMC máximos detectados (abajo).

En la mayoría de las medidas, tanto los tonos ICMC máximos como los tonos NB máximos se detectan por debajo de 20 Hz.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta el análisis de las características de las influencias acústicas y sísmicas radiadas por los buques tipo crucero. El análisis se basa en una campaña de medición realizada durante cuatro meses en el mar Mediterráneo en el Puerto de Cartagena en el sureste de España. Las medidas se realizaron con el sistema MIRS fabricado por SAES.

Se han implementado tres análisis; análisis de banda ancha mediante el procesamiento de los tercios de octava,

análisis de banda estrecha y análisis de modulación del ruido o ICMC, para estudiar las influencias acústicas y sísmicas.

El estudio concluye a partir de los resultados obtenidos de los procesamientos de banda ancha y banda estrecha que existe una correlación entre las señales acústicas y sísmicas verificando que de manera global, ambas señales son generadas por las mismas fuentes.

Los niveles obtenidos del procesamiento en tercios de octava de la influencia sísmica son aproximadamente 100 dB más bajos que el nivel de los tercios de octava obtenidos de las señales acústicas. Los resultados del procesamiento de los tercios de octava también muestran un incremento de 30 dB en el nivel de energía acústica y sísmica en relación con el nivel de ruido ambiental, como consecuencia del tráfico de cruceros.

El procesamiento de banda estrecha muestra un ancho de banda medio de interés de 50 a 745 Hz, sin que se detecten frecuencias principales más allá de 1500 Hz, estando la mayoría de las frecuencias de interés por debajo de 200 Hz. Además, se puede concluir que la mayoría de los tonos detectados en el procesamiento ICMC y banda estrecha tiene el nivel máximo en frecuencias inferiores a 20 Hz.

Trabajos futuros estarán orientados al estudio de la correlación de las influencias acústicas y sísmicas otras influencias de origen no acústico como las electromagnéticas registradas por el sistema MIRS, así como el impacto de la energía electromagnética en el medio marino.

REFERENCIAS

- [1]. European Parliament and Council. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Marine Environmental Policy (Marine Strategy Framework Directive); European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. European Union, (L. 164, 19-40, 2008.
- [2]. European Commission. Decision 2010/477/EU of the European Commission of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. Eur. Union, (L. 232, 14-24, 2010.
- [3]. Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; André, M.; Brensing, K.; Dalen, J.; Dekeling, R.P.A.; Robinson, S.; Tasker, M.L.; Thomsen, F.; Werner, S. European Marine Strategy Framework Directive-Good Environmental Status (MSFD GES); Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy; Miliu Ltd., Brussels, Belgium, 2012.
- [4]. Ross, D. On ocean underwater ambient noise. *Inst. Acoust. Bull.* 1993, 18, 5–8.
- [5]. Ross, D. Ship sources of ambient noise. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2005, 30, 257–261. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>.
- [6]. Hildebrand, J.A. Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. International Policy Workshop on Sound and Marine Mammals, London, UK, 28–30 September. 2004. Available online: <https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/hildebrand.pdf>.
- [7]. McDonald, M.A.; Hildebrand, J.A.; Wiggins, S.M.; Ross, D. A 50 years comparison of ambient noise in Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008, 124, 1985–1992. <https://doi.org/10.1121/1.2967889>.
- [8]. Merchant, N.D.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Godley, B.J.; Smith, G.H. Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and automatic identification system (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin.* 2012, 64, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.004>
- [9]. OSPAR Commission. Overview of the Impacts of Anthropogenic Underwater Sound in the Marine Environment; Report, 441; OSPAR Commission: London, UK, 2009.
- [10]. NATO Standardization Agreement N°1136 (STANAG). Standards for use when measuring and reporting radiated noise characteristics of surface ships, submarines, helicopters, etc. in relation to sonar detection and torpedo risk. NATO, Brussels, Belgium, 1995.
- [11]. Dekeling, R.P.A.; Tasker, M.L.; Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; Andersson, M.H.; André, M.; Borsani, J.F.; Brensing, K.; Castellote, M.; Cronin, D.; et al. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas; Part II: Monitoring Guidance Specifications, JRC Scientific and Policy Report EUR 26555 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2788/27158>.
- [12]. Tichavska, M.; Cabrera, F.; Tovar, B.; Araña, V. Use of the Automatic Identification System in Academic Research. In *Computer Aided Systems Theory–EUROCAST 2015*; Moreno-Díaz, R., Pichler, F., Quesada-Arencibia, A., Eds.; EUROCAST 2015. Lecture Notes in Computer Science; Springer: Cham, Denmark, 2015; Volume 9520. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27340-2_5.
- [13]. Ainslie, M.A. Standard for measurements and monitoring of underwater noise. Part I: physical quantities and their units. Rep. No TNO-DV 2011 C235. TNO, The Hague, Netherlands, 2011.
- [14]. De Jong, C.A.F.; Ainslie, M.A.; Blacquiere, G. Standard for Measurements and Monitoring of Underwater Noise. Part II: Procedures for Measuring Underwater Noise in Connection with Offshore Wind Farm Licensing. TNO-DV 2011 C251. 2011.
- [15]. ISO 18405. Underwater acoustics. Terminology. ISO, Geneva, Switzerland, 2017.
- [16]. IEC 61260. Electroacoustics-Octave-band and fractional-octave-band filters-Part 1: Specifications. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2014.