



# PROYECTO SILENCIO

## Actividad 3

### Informe del impacto de la propulsión eléctrica en la disminución del ruido marino

Versión: **Final**

Fecha: **15/12/2021**

Responsable: Soledad Torres Guijarro

## Contenido

Contenido .....	1
1.Objetivos .....	2
2.Methodología .....	2
2.1.Montaje experimental .....	2
2.2.Selección del segmento de grabación según CPA .....	3
2.3.Cálculo de niveles de emisión .....	3
2.4.Determinación del rango de frecuencias con SNR suficiente para el cálculo de niveles globales .....	4
3.Resultados .....	6
3.1.Comparación de los niveles globales emitidos por motores térmicos/eléctricos .....	6
3.2.Comparación de los espectros de potencia emitidos por motores térmicos/eléctricos .....	7
4.Conclusiones .....	8
Referencias .....	9

**Este trabajo ha sido realizado por la Universidad de Vigo para el proyecto SILENCIO, del Centro Tecnológico del Mar, que se desarrolla con la colaboración de la Fundación Biodiversidad, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través del Programa Pleamar, cofinanciado por el FEMP.**

*Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto*

## 1. Objetivos.

El objetivo de este informe es comparar el ruido emitido por motor fueraborda térmico y otro eléctrico, medido en las siguientes condiciones: ambos motores se instalan en embarcaciones similares, realizan recorridos similares y a las mismas velocidades objetivo.

El resultado principal que se busca es estimar la reducción de ruido emitido por el motor eléctrico comparado con el térmico, en las condiciones ensayadas. Como objetivo secundario se plantea comparar el espectro del sonido emitido por ambos motores.

## 2. Metodología.

A continuación se describen los métodos desarrollados para la obtención de los objetivos descritos en el apartado 1. Tras la descripción del montaje experimental se describirán los experimentos y metodologías desarrollados para, en posteriores apartados, describir y analizar los principales resultados.

### 2.1. Montaje experimental.

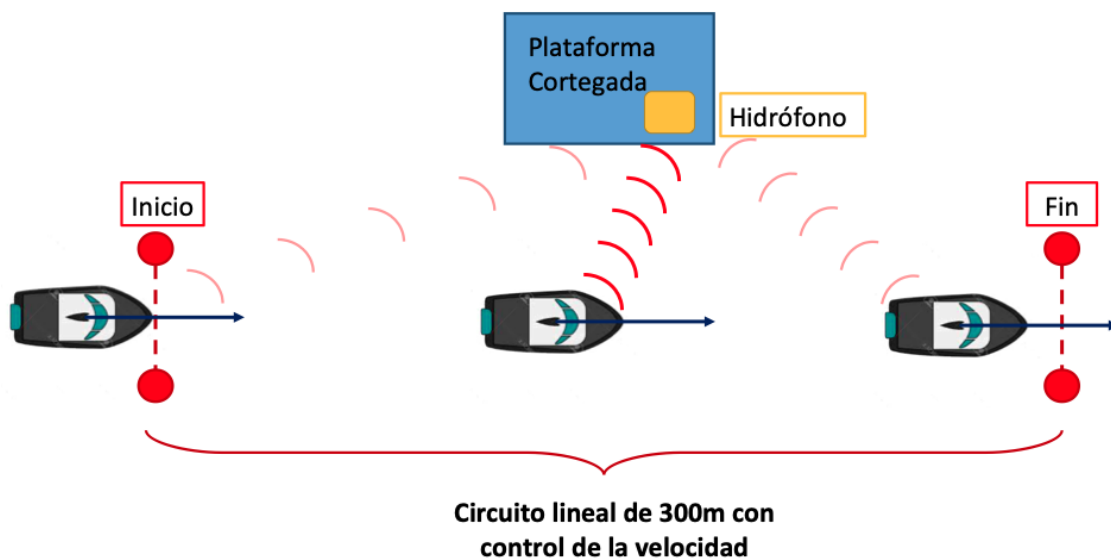


Figura 1 - Esquema de las medidas realizadas

Se plantea la realización de medidas experimentales en el entorno de Plataforma de Cortegada, donde está instalado el hidrófono. Las medidas se realizan a partir de la grabación del sonido de los motores en condiciones de funcionamiento controladas. Se organizan las pruebas bajo el siguiente procedimiento esquematizado en la Figura 1:

- Las embarcaciones propulsadas por los motores bajo estudio realizan trayectos por una pista señalizada, paralela al lado Este de la plataforma, a una distancia de la misma de 50 m, y con una longitud total de 300 m.
- Cada trayecto se registra mediante un receptor GPS instalado en las embarcaciones.

- Para cada uno de los motores (térmico y eléctrico) se realizan 3 iteraciones consistentes cada una en 3 pases (ida-vuelta) a 3 velocidades: 5.5, 4 y 2.5 nudos. En total se planificaron 36 pruebas, 18 con cada motor.
- En cada trayecto, el piloto ajusta la velocidad del barco, medida por el GPS, a la velocidad objetivo.
- Se sincronizan los relojes GPS con los del hidrófono de medida.

La batería del motor eléctrico se descargó antes de la finalización de las pruebas con lo que la medición de la vuelta del último pase a 2.5 nudos no se pudo realizar.

Para cada una de estas pruebas se realiza el cálculo de niveles de emisión globales y por bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava para posterior comparación y análisis.

## 2.2. Selección del segmento de grabación según CPA.

La metodología desarrollada se inspira en la norma de medida de ruido submarino emitido por barcos en aguas profundas [1] – la normativa de aguas someras todavía está en desarrollo –, la cual propone la realización de la medida mediante un pase de barco midiendo en el instante en el que el barco en movimiento alcanza la distancia mínima con el hidrófono, distancia conocida como punto de aproximación más cercano (CPA, Closest Point of Approach).

La selección de este punto se realiza mediante un análisis de distancia mínima sobre los datos GPS de cada trayecto del que se obtiene el instante temporal correspondiente en la grabación del hidrófono. Una vez obtenido este instante, se selecciona una ventana temporal de 20s –10 s antes y 10 después de la marca temporal CPA– como datos de medida de cada una de las pruebas. Con esta ventana temporal nos aseguramos de promediar la directividad de la fuente, que es de esperar que varíe notablemente con el ángulo.

El análisis visual de los espectrogramas de la grabación sirvió para confirmar la sincronización obtenida mediante este método, viendo que la marca temporal del CPA coincidía con el instante temporal de máximo nivel presente en cada prueba.

## 2.3. Cálculo de niveles de emisión.

Una vez seleccionado el segmento de audio a analizar para cada una de las pruebas, se plantea la siguiente cadena de procesamiento para la obtención de los niveles de emisión de barco, también conocidos como nivel de ruido radiado [1] o nivel de fuente (SL, Source Level):

1. **Cálculo de niveles del nivel cuadrático medio de la presión sonora recibida (RL).** Para cada una de las medidas, el segmento de 20s seleccionado en torno al CPA se divide en 20 segmentos de 1s. De cada uno de ellos se calcula la densidad espectral de potencia mediante la técnica del periodograma de Welch (promediando segmentos de 1s) y luego se integra en  $\frac{1}{3}$  de octava y en banda ancha para la obtención del RL en bandas y global.
2. **Estimación de pérdidas de transmisión con modelo de propagación cilíndrica.** El cálculo del nivel de fuente (SL) se calcula como la normalización del nivel recibido (RL) a una distancia de 1m de la fuente [1]. Para calcularlo es necesario añadir al nivel recibido las pérdidas de transmisión (TL) entre hidrófono y fuente. El cálculo preciso de las TL mediante un modelo computacional requeriría conocer con

detalle la composición del fondo marino en el lugar del ensayo. Dado que no disponemos de esta información, y que el objetivo del estudio no es estimar niveles emitidos sino compararlos, se decide emplear un modelo de pérdidas analítico aproximado. En el caso que nos ocupa, dado que la profundidad del canal es del orden de 10 veces menor que la distancia entre fuente e hidrófono, el modelo recomendado es el modelo de propagación cilíndrica definido como [2, pág. 24]:

$$TL_{cil}=10*\log_{10}(d/1m)$$

3. **Cálculo de nivel de fuente (SL).** A partir de los niveles de presión sonora recibidos (RL) y las pérdidas de transmisión se calculan los niveles de fuente de cada prueba en función de la distancia  $d$ , calculada como la distancia entre el hidrófono y el CPA, según:

$$SL=RL+TL(d)$$

Estos niveles de fuente se calculan para cada  $\frac{1}{3}$  de octava entre 20 - 20000 Hz así como su valor global.

La Figura 2.1 muestra un ejemplo de los niveles de fuente en bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava, y global (SLf) obtenidos para la primera prueba del motor térmico:

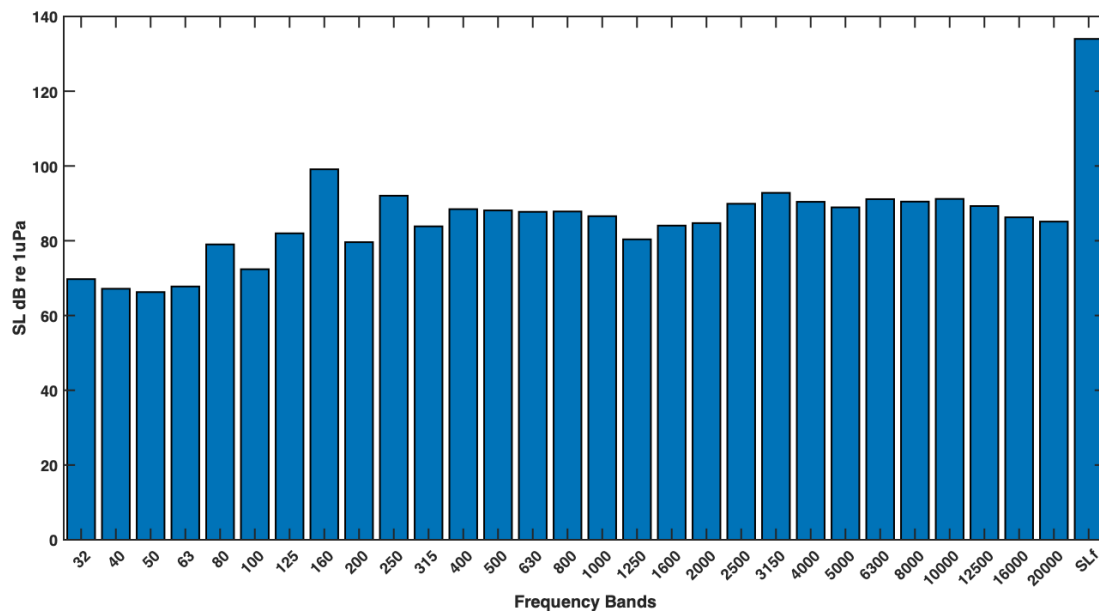


Figura 2 - SL en  $\frac{1}{3}$  de octava y global (SLf), primera prueba motor térmico

## 2.4. Determinación del rango de frecuencias con SNR suficiente para el cálculo de niveles globales.

Para asegurar la validez de las medidas realizadas es conveniente que las mismas hayan sido obtenidas con una relación señal a ruido de fondo superior a 10 dB, de forma que no sea necesaria la corrección por ruido de fondo [1]. Para comprobar esta exigencia se mide el nivel de ruido de fondo (NL, Noise Level) en 5 instantes a lo largo de la sesión de medidas. Estos niveles se promedian y sustraen de los niveles de emisión para obtener la relación señal a ruido de cada prueba con la que poder testar el umbral de 10dB:

$$SNR=SL-NL >10dB \text{ [Umbral SNR]}$$

Siguiendo la expresión anterior se calcula la SNR en bandas para todas las pruebas. Podemos ver los resultados en las figuras 3 (pruebas IDA) y 4 (pruebas VUELTA), que representan la SNR de cada una de las pruebas y cada una de las bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava, así como para en ancho de banda completo (Slf, 20 -20000). Se han separado los resultados de esta manera porque, como se explica más adelante, los trayectos de ida se realizaron contra el viento y los de vuelta a favor del viento, lo que se traduce en mayores niveles de fuente en la ida.

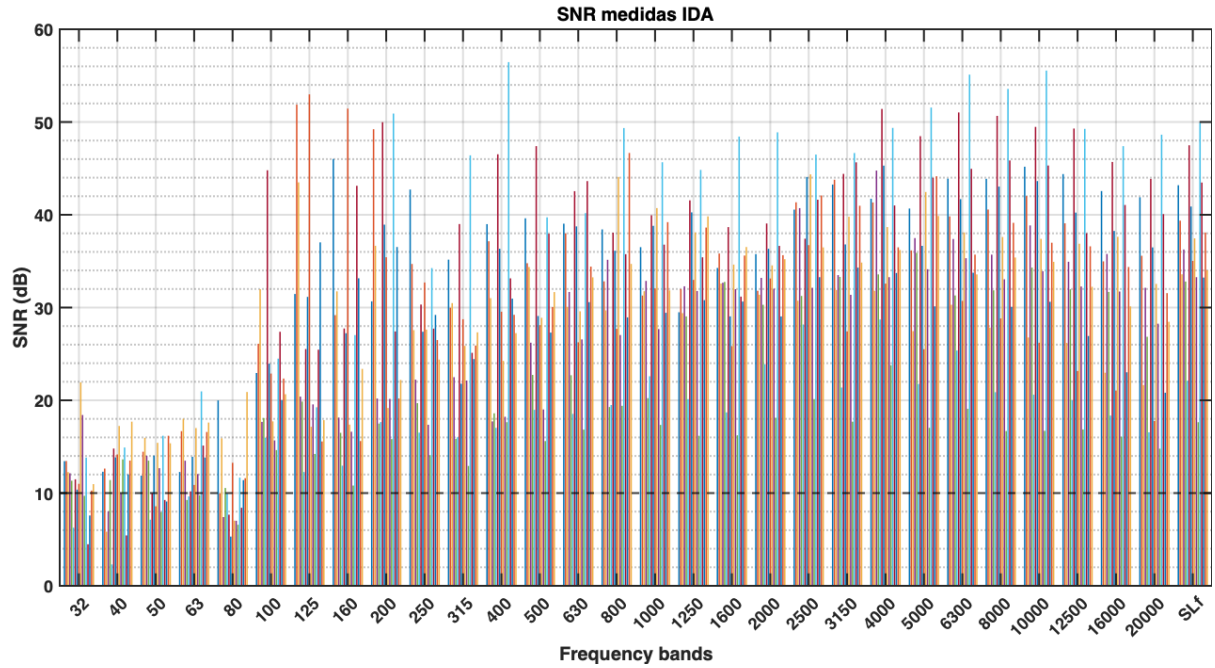


Figura 3 - SNR en bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava y global (Slf) para todas las pruebas dirección *ida*

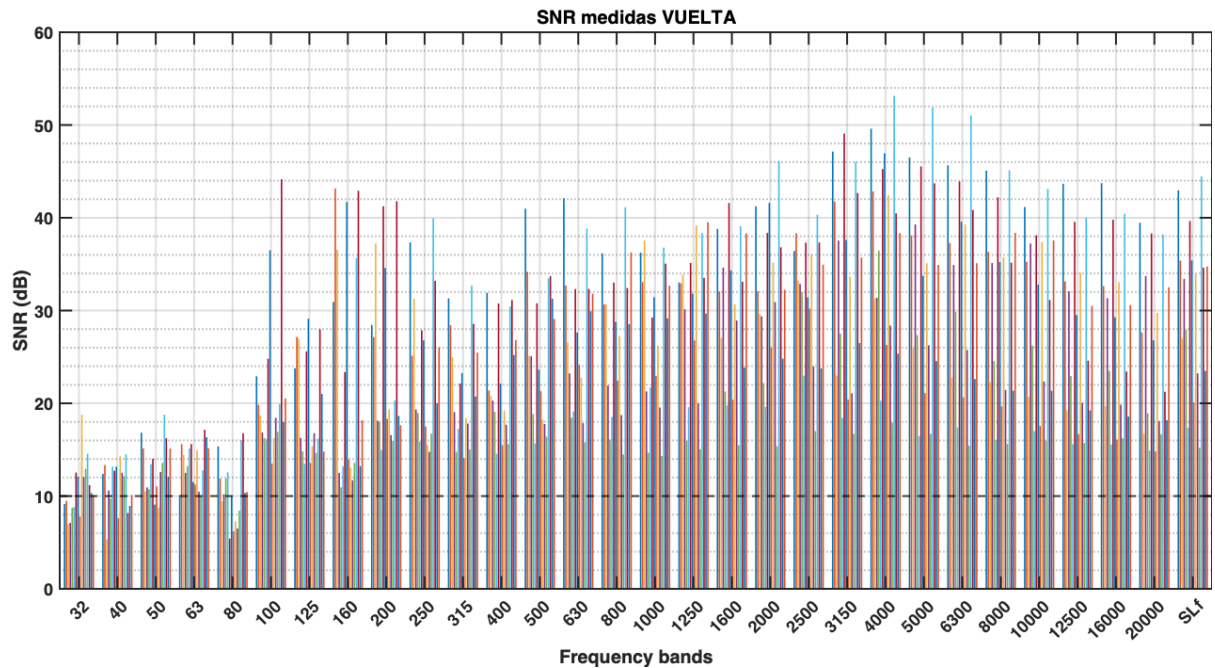


Figura 4 - SNR en bandas de  $\frac{1}{3}$  de octava y global (Slf) para todas las pruebas dirección *vuelta*

Al comparar las diferentes SNR con el límite de 10 dB (línea horizontal discontinua) se observa que las bandas por debajo de 100 Hz presentan problemas para alcanzar el umbral de calidad establecido. De hecho, se observa un efecto filtro paso alto a partir de la frecuencia de 100Hz claramente visible en la atenuación de las frecuencias por debajo de esta banda. Este efecto tiene su explicación en 3 causas:

- La propagación del sonido en aguas someras se caracteriza por la dificultad de la propagación de las bajas frecuencias [3].
- El análisis del espectro del ruido emitido por los motores fueraborda [4] muestra un reducido nivel de emisión en estas bandas.
- El elevado ruido de flujo que se produce en el hidrófono en baja frecuencia debido a las fuertes corrientes de la zona.

Siguiendo este razonamiento se decide eliminar estas bandas de frecuencia en los cálculos de niveles de emisión global, estableciendo el nuevo ancho de banda entre 100-20000Hz. Los niveles globales prácticamente no se ven afectados al estar los niveles en estas bandas muy por debajo de los de las demás.

### 3. Resultados.

A continuación se resumen los principales resultados obtenidos de las medidas de pases de barco descritas en los anteriores apartados.

#### 3.1. Comparación de los niveles globales emitidos por motores térmicos/eléctricos.

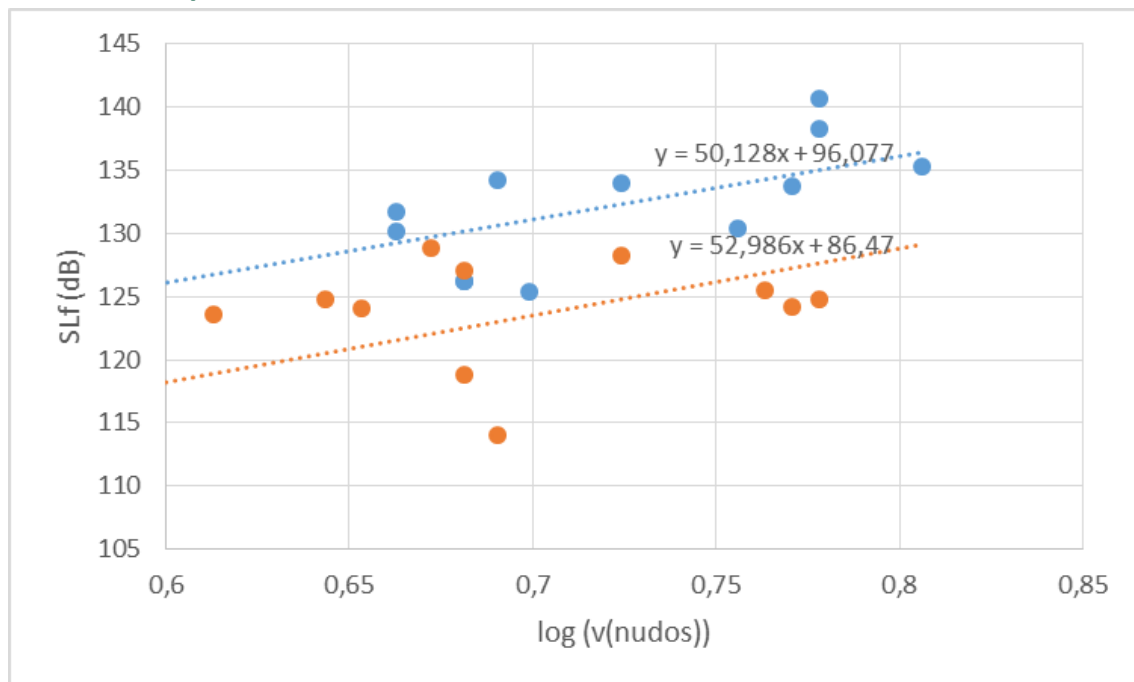


Figura 5 - Diagrama de dispersión de niveles de fuente vs. logaritmo de la velocidad (en nudos), y rectas de regresión. Azul: motor térmico, Rojo: motor eléctrico.

Dado que durante el experimento las velocidades reales de las embarcaciones difirieron considerablemente de las nominales (5.5, 4 y 2.5 nudos), hemos optado por aproximar el nivel de fuente global de cada tipo de motor (térmico y eléctrico) en función de la velocidad mediante una línea de tendencia. En concreto, partiendo del modelo RANDI de nivel de ruido de barcos [5], asumimos que el nivel de fuente depende linealmente del logaritmo de la velocidad. Calculamos por ello la recta de regresión que mejor aproxima todas las medidas de cada tipo de motor, obteniendo los resultados de la Figura 5.

En ella se observan los pares (SLf, log(v)) para el motor térmico (puntos azules) y el eléctrico (puntos rojos), y las dos rectas de regresión. La distancia entre ambas rectas es de 9,3 dB en el extremo inferior del rango de velocidades ensayadas (2,5 nudos), y de 7,9 dB en la mayor velocidad ensayada (6,4 nudos). Como conclusión, a cualquier velocidad dentro de este rango la diferencia media de nivel de fuente entre los dos motores está en el entorno de los 8 ó 9 dB.

### 3.2. Comparación de los espectros de potencia emitidos por motores térmicos/eléctricos.

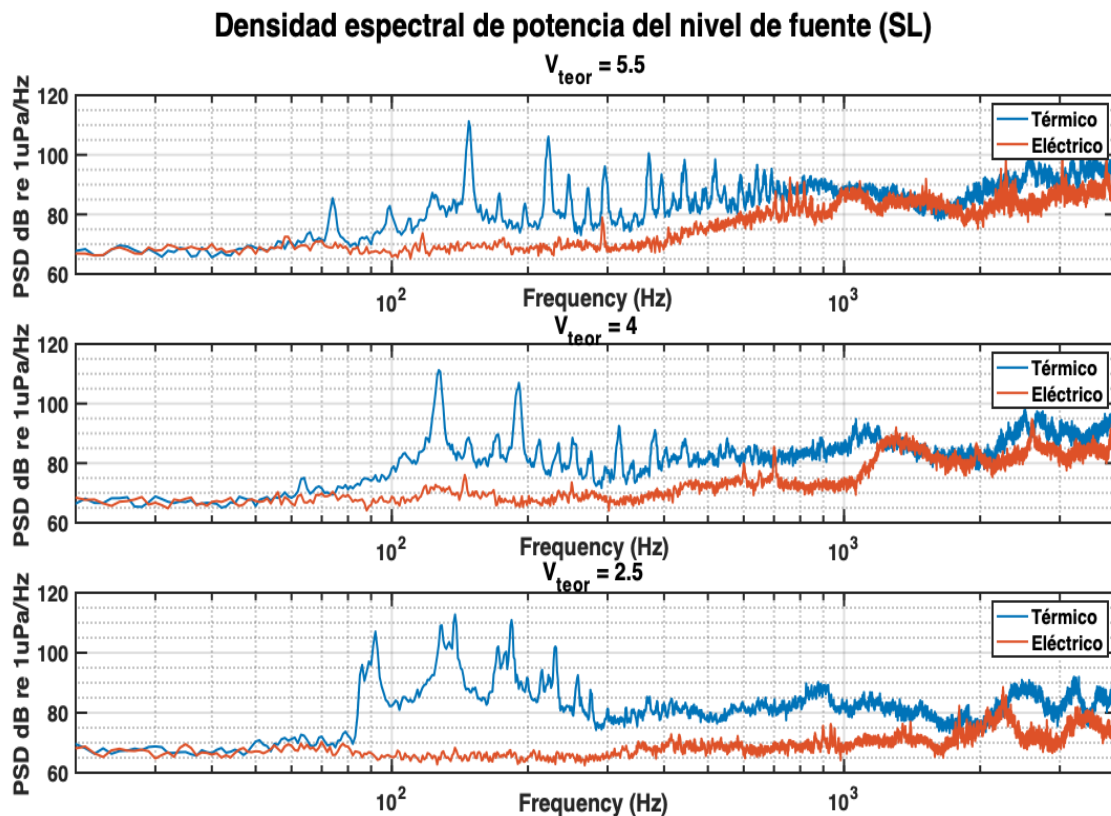


Figura 6 - ejemplo de comparativa térmico/eléctrico de la PSD del nivel de fuente (SL) para las 3 velocidades del primer pase

La Figura 6 nos muestra un ejemplo de comparativa entre motor térmico y eléctrico que nos sirve para presentar un análisis cualitativo del comportamiento de ambos motores, complementario al estudio cuantitativo realizado en el apartado anterior.



El análisis de la figura nos permite extraer:

1. **Por debajo de 1 kHz** el motor térmico tiene muchas más componentes tonales – representados por los picos en la figura– que el motor eléctrico, que prácticamente no muestra picos tonales importantes en esta zona. Las componentes tonales se hacen más graves a medida que desciende la velocidad. Las mayores diferencias de nivel se dan para las velocidades bajas obteniéndose diferencias medias entre 10-20 dB mientras que, para ciertas componentes tonales, se alcanzan distancias pico a pico de hasta 40 dB.
2. **En torno a la frecuencia de 1 kHz** los espectros tienden a asemejarse, sobre todo para las velocidades objetivo de 4 y 5.5 nudos.
3. **A partir de 2-3 kHz** los espectros vuelven a separarse manteniendo una distancia entre 5-10 dB.

El análisis nos permite concluir que los motores eléctricos son considerablemente más silenciosos, sobre todo por debajo de 1kHz y para velocidades bajas. La banda de 1-2 kHz acerca el comportamiento de los motores (sobre todo para velocidades altas) y partir de 2 kHz el motor eléctrico vuelve a ser el más silencioso.

## 4. Conclusiones.

Del estudio realizado se concluye que, en el rango de velocidades ensayado (entre 2,5 y 6,4 nudos) el motor eléctrico es en media unos 8 ó 9 dB más silencioso que el térmico, siendo las diferencias entre ambos más acusadas por debajo de 1 kHz y por encima de 2 kHz.

Es preciso hacer notar que la variabilidad en el nivel de fuente medido es grande, llegando a los 15 dB para el mismo motor a la misma velocidad. Este resultado es coherente con los de otros estudios, que refieren diferencias de hasta 20 dB [4,6], y puede deberse a distintos factores, entre ellos, el hecho de que al navegar contra el viento, los motores necesitan ir más revolucionados para acercarse a la velocidad objetivo, lo que eleva el nivel de fuente.

## Referencias

- [1] ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes
- [2] Erbe, C. (2011). Underwater acoustics: noise and the effects on marine mammals. *A Pocket Handbook*, 164, 9-10.
- [3] Katsnelson, B., Petnikov, V., & Lynch, J. (2012). *Fundamentals of shallow water acoustics*. Springer Science & Business Media.
- [4] Erbe, C., Liong, S., Koessler, M. W., Duncan, A. J., & Gourlay, T. (2016). Underwater sound of rigid-hulled inflatable boats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(6), EL223-EL227.
- [5] Breeding, J. E., Pflug, L. A., Bradley, M., Hebert, M., & Wooten, M. (1994). *RANDI 3.1 user's guide*. Naval Research Lab Stennis Space Center MS.
- [6] Parsons, M. J., Erbe, C., Meekan, M. G., & Parsons, S. K. (2021). A Review and Meta-Analysis of Underwater Noise Radiated by Small (< 25 m Length) Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 827.