



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -  
TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## **NUEVAS TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN DE HIDRÓFONOS EN BAJA FRECUENCIA CON RELACIÓN A LA MSFD**

**PACS:** 43.30.-k, 06.20.-f, 43.25.-x, 43.38.-p, 43.60.-c, 43.58.-e

I.Felis\*; P.Cervantes; P.Ruiz; R.Martínez; H.Er-rachdi  
Institución: Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN)  
Dirección: Parque Tecnológico de Fuente Álamo, Ctra El Estrecho-Lobosillo Km2, 30320  
Población: Fuente Álamo, Murcia  
País: España  
Tel: +34 968 19 75 21  
E-Mail: ivanfelis@ctnaval.com

**Palabras Clave:** Calibración de hidrófonos, Procesado de baja frecuencia, MSFD.

### **ABSTRACT**

In order to meet with the requirements of Descriptor 11, regarding the quantification of underwater noise, of the marine strategy framework directive (MSFD), it is necessary to perform low frequency measurements below 10 kHz. Hydrophone calibration in this low frequency range according to international standards (IEC60565) it is required to use large installations, allowing times without very large echoes. In this presentation, the CTN proposes new techniques for calibrating hydrophones, beyond the standards, which allow calibrations at low frequencies in more moderate installations. Methods based on the emission of bandwidth signals (sweep) along with processing techniques that help spatial discrimination of signals (cross correlation) are the basis for the development of these new calibration techniques. In addition, the use of non-linear acoustic effects to focus acoustic emission has advantages for this purpose.

### **RESUMEN**

Para cumplir con parte de los requisitos del Descriptor 11, referente a la cuantificación de ruido subacuático, de la directiva marco de estrategia marina (MSFD), resulta necesario realizar mediciones por debajo de 10 kHz. Para la calibración de hidrófonos en este rango de frecuencias según los estándares internacionales (IEC60565), se requiere emplear instalaciones de grandes dimensiones, que permitan contar con tiempos sin ecos muy grandes. En esta presentación, el CTN plantea nuevas técnicas de calibración de hidrófonos, más allá de los estándares, que permiten realizar calibraciones en bajas frecuencias en instalaciones con dimensiones más moderadas. Los métodos basados en la emisión de señales de ancho (sweep) de banda junto con técnicas de procesado de señal que ayuden a la discriminación espacial de señales (correlación cruzada) son la base para el desarrollo de estas nuevas técnicas de calibración.



**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -  
TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

## 1. Introducción

### 1.1 Registro de ruido según MSFD

La Ley 41/2010 de protección del medio marino es el instrumento de transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva marco sobre la Estrategia Marina (Directiva 2008/56/CE, MSFD) que establece las estrategias marinas como el instrumento básico de planificación para todas las aguas marinas sometidas a soberanía o jurisdicción española. La MSFD establece que los Estados Miembros deben abordar las medidas necesarias para alcanzar o mantener el Buen Estado Ambiental (GES) en el año 2020.

Para ayudar a los Estados miembros a interpretar lo que significa el GES en la práctica, la Directiva establece, en el Anexo I, once descriptores cualitativos que describen cómo se verá el entorno cuando se haya logrado el GES. De entre ellos, el Descriptor 11 establece que la "introducción de energía (incluido el ruido subacuático) no afecte negativamente al ecosistema". Para su implementación, deben desplegarse sistemas de capaces de registrar dos tipos de ruido, establecidos como criterios:

- Criterio D11C1 "Sonido impulsivo de origen antropogénico en el agua" (ej.: explosiones, pilotaje, etc.), descrito como el nivel sonoro de la fuente de energía monopolar o como la variación del nivel desde cero hasta el nivel máximo de la fuente monopolar, ambos en la banda de frecuencias entre 10 Hz y 10 kHz.
- Criterio D11C2 "Sonido continuo de origen antropogénico de baja frecuencia en el agua" (ej.: tráfico marítimo, operaciones de dragado, etc.). La evaluación de este criterio requiere la medida de la presión sonora en las bandas de tercio de octava centradas en 63 y 125 Hz.

Estos sistemas de monitorización deberán, pues, tener instalados hidrófonos correctamente calibrados para el registro de estas bandas frecuenciales.

### 1.1 Calibración de hidrófonos

La calibración de un transductor acústico consiste en, en el caso de los sensores, determinar la tensión de salida  $V$  que genera en función de una determinada presión acústica recibida  $p$  que incide sobre él en campo libre. El parámetro utilizado para llevar a cabo una calibración es la sensibilidad, en términos del  $RVR = 20 \cdot \log(V/p)$  [ $dB @ V/\mu Pa$ ].

Existen distintos métodos de calibración (comparación directa, reciprocidad, etc.), recogidos en la norma IEC 60565:2006 "Acústica submarina. Hidrófonos. Calibración en el rango de frecuencias de 0,01 a 1 MHz". En la mayoría de las técnicas habituales, es necesario mantener los transductores correctamente alineados y realizar las mediciones en condiciones de campo libre, es decir, sin reflexiones. Pequeñas variaciones en, por ejemplo, la distancia o la alineación, podrían producir reflexiones y realimentaciones que condujesen a un mal calibrado [1] [2].

La calibración de hidrófonos es una de las competencias fundamentales del Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN). Para ello, el centro dispone del equipo e infraestructura necesaria para la realización de medidas de caracterización de transductores y materiales en agua hasta una frecuencia de 5 kHz. Por debajo de esta frecuencia son cada vez más acusados los efectos de las reflexiones laterales y la influencia del consecuente campo reverberado.

En este texto se muestran parte de los avances del conocimiento del CTN en lo referente a nuevas técnicas de procesamiento de señal, con aplicaciones a bajas frecuencias que son utilizadas en números ámbitos de los estudios del medio marino, aunque no exclusivamente.

## 1.2 Limitación de las reflexiones

La condición de campo libre limita, en la práctica, el rango frecuencial de los hidrófonos que se quieran calibrar. En general, si las medidas se realizan en agua con una velocidad de propagación  $c$ , de modo que la distancia entre el emisor y el receptor fuera  $d$  (la señal directa se obtendría en un tiempo  $t_{dir} = d/c$ ) y se utilizara un burst de senos de duración  $\tau$ , debe cumplirse que el tiempo de llegada  $t_{ref}$  de la primera reflexión cumpla:  $t_{ref} > t_{dir} + \tau$ .

La mayoría de las instalaciones para la calibración de hidrófonos consiste en una piscina paralelepípedica en la que los transductores se posicionan convenientemente para evitar las reflexiones. En un recinto paralelepípedico con ancho  $L$  y profundidad  $H$ , situando los transductores alineados en el centro, las reflexiones pueden producirse por: las superficies horizontales superior e inferior, por las laterales, y por las superficies de los propios transductores. Las expresiones de los tiempos de llegada de estas tres reflexiones son [3]:

$$t_{ref1} = \frac{\sqrt{d^2 + H^2}}{c} \quad t_{ref2} = \left( \left( \frac{L}{2} + \frac{d}{2} \right) + \left( \frac{L}{2} - \frac{d}{2} \right) \right) / c = L/c \quad t_{ref3} = 2d/c \quad (1)$$

Por su parte, el CTN dispone de una balsa de calibración de hidrófonos de grandes dimensiones, que además presenta una forma troncocónica que permite desviar las reflexiones laterales de modo que en las medidas únicamente influye la superficie del agua. Con ello, se consigue una frecuencia inferior de trabajo, para calibraciones con burst de 5 ciclos de señal, de 5 kHz.

La

Figura 1 muestra, a la izquierda, la geometría de la balsa del CTN y, a la derecha, una gráfica con los volúmenes de agua útil y la frecuencia mínima de calibración, en función de la distancia entre los transductores. Las curvas teóricas se obtienen aplicando las ecuaciones (1) mientras que los puntos corresponden a distintas instalaciones existentes de calibración de hidrófonos.

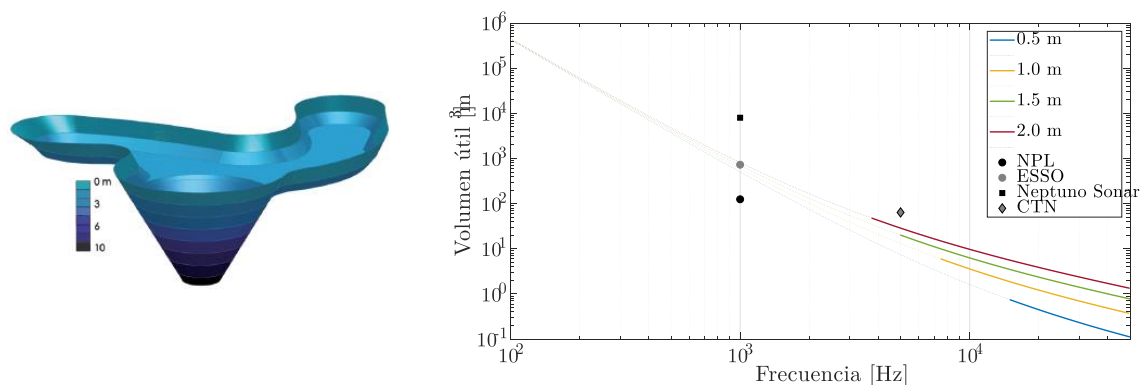


Figura 1. Izquierda, modelo en 3D del tanque troncocónico de grandes dimensiones del CTN. Derecha, Instalaciones de tanque troncocónico en el CTN.

Estos son los límites a los que pueden llegar estas instalaciones. En este texto se muestran los primeros estudios realizados para poder realizar medidas con frecuencias más bajas.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -  
TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## 2. Metodología propuesta

Como se ha comentado, el problema fundamental para la calibración de hidrófonos por comparación directa empleando la norma IEC 60565 es la existencia, en todo proceso de medida, de las reflexiones que, en principio, sólo puede ser salvada con infraestructuras de medición cada vez más grandes cuanto más baja sea la frecuencia en la que calibrar. No obstante, las técnicas de procesado pueden ofrecer algunas ventajas para reducir dicho rango.

En el dominio de tiempo, cuando realizamos una medida en la que aparece tanto la señal directa como la primera reflexión, esto se manifiesta como un solape de ambas señales. Por ello, la técnica a emplear debe ser capaz de, al menos, establecer una discriminación entre ambas señales. Entre otras, la correlación cruzada es una herramienta que facilita dicho propósito.

Por ello, se propone un método de medición con las siguientes características:

- Emplear señales de banda ancha como sweeps para, mediante una única medida, realizar un barrido de las frecuencias de interés.
- Emplear una nueva versión de la correlación cruzada que permite tanto discriminar entre señal directa y reflexión, como obtener la amplitud de las frecuencias que contiene la señal.

### 2.1 Correlación cruzada

La correlación es una operación entre dos señales cuyo objetivo es medir la similitud que existe entre ambas y, así, extraer información que depende de la aplicación concreta considerada [4].

Sean dos señales de energía finita  $x(t)$  e  $y(t)$ , la correlación cruzada entre ambas  $r_{xy}(\tau)$  es un indicador de la medida de la similitud entre ambas señales, de modo que la *distancia* entre las señales será menor para aquellos valores de desplazamiento relativo entre ellas  $\tau$  en que  $r_{xy}$  sea mayor. Mediante distintos estudios [5] se ha demostrado que, para la correlación entre una señal de tipo senoidal  $y_{rec}$  registrada por un transductor y la misma señal pero sintetizada analíticamente  $x_{env}$  de amplitud unidad y longitud  $N$ , existe una relación entre su máximo  $\max\{r_{xy}\}$  y la amplitud de la señal medida  $A(y_{rec})$ , que se puede expresar mediante:

$$A(y_{rec}) = \frac{2 \max\{r_{xy}\}}{N} \quad (2)$$

Estudios propios del CTN han demostrado que dicha expresión sigue siendo válida para la correlación de señales de banda ancha tipo sweep. Con ello, dado que con la correlación resulta mucho más sencillo detectar un sweep (en general, señales de banda ancha) que un seno, debido a que el pico de correlación es mucho más estrecho, nos encontramos ante un método para detectar y obtener la amplitud de señales aun cuando se realicen medidas con influencia de reflexiones cercanas.

Este hecho ha sido el punto de partida para obtener un nuevo método de análisis en la calibración de hidrófonos utilizando señales de este tipo, sin recurrir a medidas reiteradas de emisión-recepción del conjunto de tonos que se quiera estudiar [6], ni a otras técnicas más complejas [7]. Asimismo, la mejor facilidad de detección de estas señales permitirá abordar el estudio de calibración de hidrófonos en baja frecuencias, en condiciones tales que se imposibilitan la aplicación de las técnicas habituales de calibración (influencia de reflexiones y campo reverberado). En este texto, se muestran los primeros estudios sobre las características, bondades y mejoras de la correlación cruzada para la calibración de hidrófonos con señales de ancho de banda.

## 2.2 Correlación cruzada enventanada

El siguiente paso ha sido intentar obtener una técnica de procesado en la que, con una única medida de un sweep lo suficientemente ancho temporal y frecuencialmente, se pueda obtener información de cada una de las frecuencias que lo componen. Con ello, no solamente se reduciría el tiempo de la calibración, sino que se simplificaría el post-procesado de las medidas.

Para este propósito la Figura 2 muestra un ejemplo de un sweep lineal ( $x_0$ ), y su convolución ( $x_w$ ) con una ventana gaussiana móvil ( $w$ ), así como la correlación cruzada de la señal original desplazada 2 ms con cada una de las señales enventanadas.

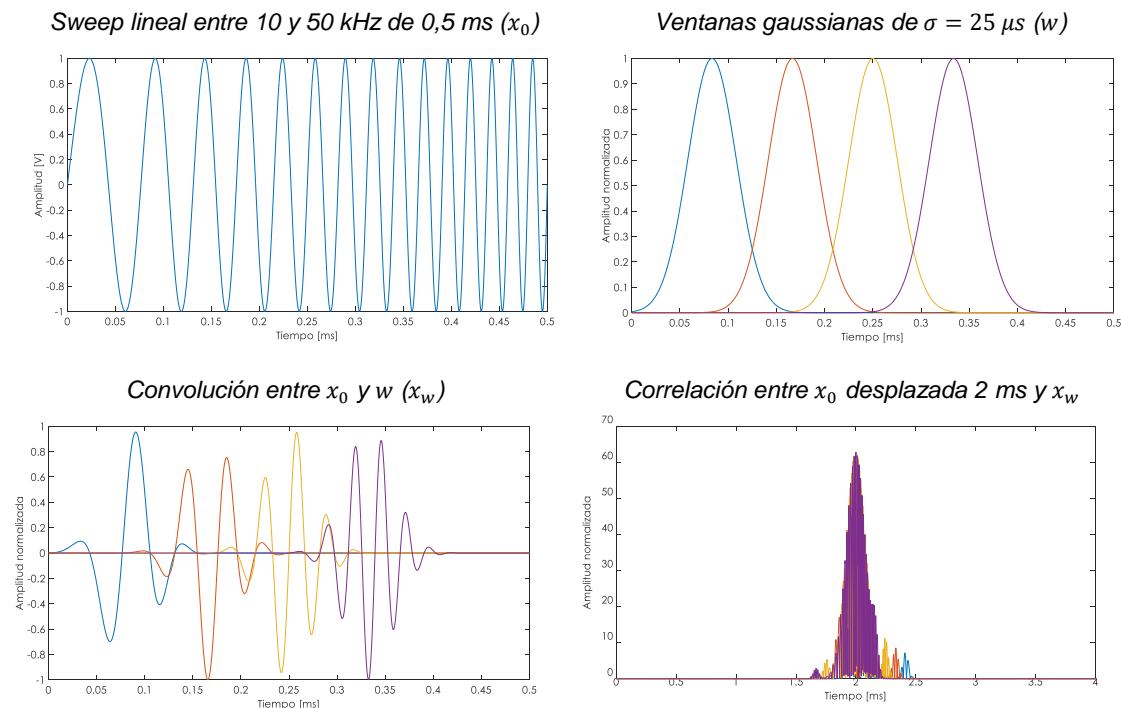


Figura 2. Ejemplo de correlación cruzada para un sweep con una ventana gaussiana móvil.

En  $x_w$  se observa que la posición de  $w$  muestra las componentes frecuenciales de  $x_0$ . Por su parte, en la correlación resultante se observa que todas presentan el pico de correlación en el tiempo esperado pero que, por una parte, el ancho de la correlación es algo mayor y que la amplitud del pico es menor, si compramos con la correlación sin enventanado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Estudios realizados en el CTN muestran que el ancho de la correlación depende del ancho de la ventana gaussiana, siendo más estrecho cuanto más ancho es el enventanado, pues se evidencia un mayor contenido espectral. Por ello, habrá que encontrar un ancho óptimo que permita una buena detección de las señales. Adicionalmente, respecto a la amplitud de los picos resultantes, se ha obtenido una expresión que generaliza la ecuación (2) para la obtención de la amplitud de la señal inicial en cada una de las señales enventanadas y, por ende, de la amplitud de la frecuencia central de las mismas. Dicha expresión se puede expresar como:

$$A(x_{rec}) = \underbrace{\frac{2 \max\{r_{xy}\}}{N}}_{\text{término sin enventanado}} \cdot \underbrace{\frac{\int |x_0| dt}{\int |x_w| dt}}_{\text{corrección por enventanado}} \quad (3)$$

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -  
TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Aplicando esta expresión a cada una de las correlaciones resultantes, se obtiene la misma amplitud del sweep original (la unidad, igual en todas las frecuencias). Entonces, dado que cada una de las señales enventanadas  $x_w$  presenta un contenido frecuencial distinto, dada por su posición temporal y evolución del sweep original (en este caso, lineal), tenemos una forma de extraer el contenido frecuencial del sweep original.

### 3. Montaje experimental

Las mediciones acústicas se llevan a cabo en las instalaciones del Laboratorio de HidroAcústica (LHA) del CTN. Esta instalación consiste en una balsa de agua, con forma troncocónica de diámetro mayor 20 metros y una profundidad máxima de 10 m.

El tanque troncocónico dispone de dos posicionadores automatizados para el correcto posicionamiento de los elementos que intervienen en la medida. Estos dos posicionadores son capaces de mover los elementos acoplados a los mismos (en este caso, los transductores) en varios ejes de libertad. En ambos posicionadores se instalan los transductores encargados de la emisión y recepción de señal. La distancia escogida entre los transductores es de, aproximadamente, 68 cm, que posteriormente será obtenida con precisión mediante cálculo de tiempo de vuelo de sweeps. La profundidad de los transductores en el momento de la medición es de 3 m. La resolución de movimiento de cada uno de los ejes lineales es de 1 mm y, de los ejes de rotación, de 0.1 grados. La Figura 3 muestra una imagen de la balsa y la disposición de los transductores previa a la inmersión.

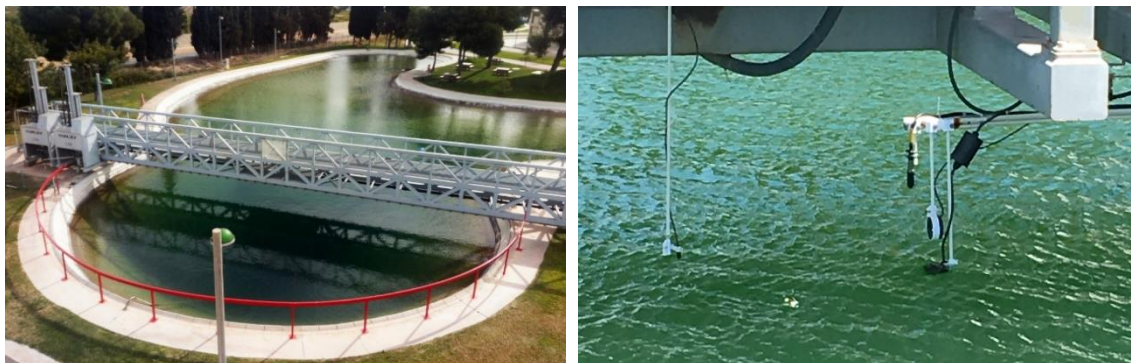


Figura 3. A la izquierda, imagen de la balsa de calibración. A la derecha, imagen de la disposición de los transductores antes de su inmersión para realizar los experimentos.

Los transductores utilizados para las mediciones acústicas fueron: como hidrófono receptor AS1 de Aquarian Sound, con una sensibilidad de  $-208$  dB re  $1\text{V}/\mu\text{Pa}$  en el rango frecuencial entre 1 Hz y 100 kHz, y un patrón prácticamente omnidireccional; como transductor emisor un Reson TC4040 para frecuencias entre 15 y 100 kHz, y un BenthWave 7593 para frecuencias entre 1 y 15 kHz.

Los amplificadores de potencia utilizados fueron: un amplificador AE&I 1040 L para el rango frecuencial mayor a 15 kHz, con una ganancia de 55 dB; y el amplificador Wadia A340 para frecuencias inferiores a 15 kHz, con una ganancia de 29 dB. Adicionalmente, en recepción se utilizaron preamplificadores Aquarian Sound con una ganancia de 50 dB.

Para la adquisición de señal se utilizó la tarjeta de adquisición de National Instruments NI PXIe 1073, con una frecuencia de muestreo de 2 Ms/s y se realizó el control, tanto del sistema acústico como de los posicionadores, mediante un software diseñado expresamente en Matlab.

#### 4. Resultados obtenidos

Una vez posicionados los transductores, se emitieron una serie de sweep para, mediante correlación cruzada, establecer la distancia entre transductores y el tiempo en el que llegaban las reflexiones. La Figura 4 muestra uno de los resultados, donde vemos que la señal directa llega a los 0.45 ms (que corresponde a 68 cm entre emisor y receptor) y la primera reflexión a los 1.25 ms. De esta diferencia de tiempos se infiere que, en esta colocación de los transductores, la mínima frecuencia para realizar calibraciones enviando burst de 5 ciclos es de 6.25 kHz.

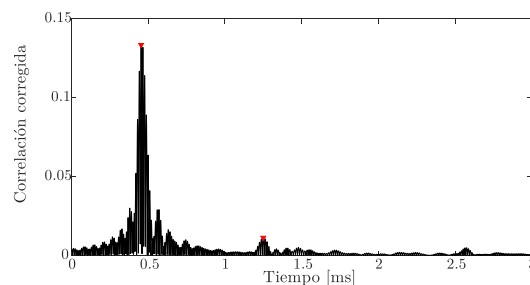


Figura 4. Correlación cruzada entre un sweep enviado y recibido de 30 a 50 kHz de 1 ms.

En primer lugar, se realizan medidas sin solapamiento de reflexiones emitiendo senos entre 15 y 100 kHz para contrastarlos con medidas de sweeps en este rango frecuencial. La Figura 5 muestra los tiempos de vuelo y las amplitudes obtenidas con ambos tipos de señales, cuya baja desviación evidencia la equivalencia entre la metodología de medir con senos respecto a sweeps con el procesado propuesto. A la izquierda se observa que, tanto para sweeps con corta duración (1 ms) como larga (10 ms) en los que existen varias reflexiones, la técnica permite una correcta discriminación entre señal directa y primera reflexión. A la derecha se observa que las amplitudes reconstruidas utilizando la expresión (3) con sweeps reproduce los niveles de presión obtenidos con burst de tonos puros con desviaciones inferiores a 1 dB en la señal directa y hasta 4 dB en la señal reflejada. Además, dichas variaciones aun mejoran si se utilizan sweeps logarítmicos.

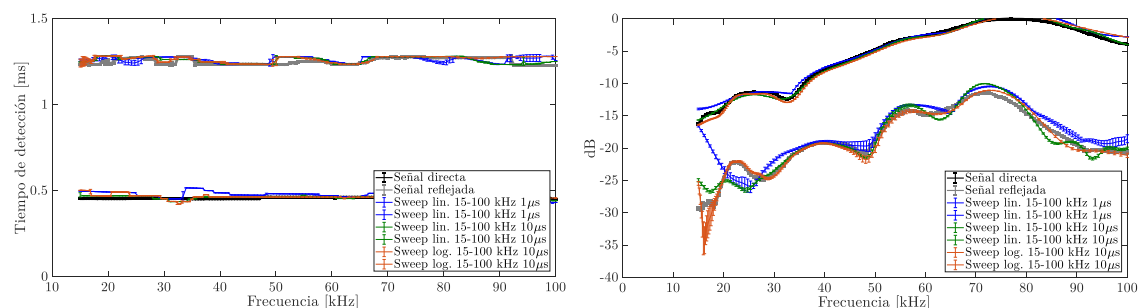


Figura 5. A la izquierda, tiempos de detección de la señal directa y reflexión para cada sweep de 15 a 100 kHz medido. A la derecha, amplitudes obtenidas mediante correlación cruzada enventanada.

A continuación, se realizaron estudios con sweeps de frecuencias inferiores a 6.25 kHz cuya duración supera el intervalo entre señal directa y reflejada. La Figura 6 muestra los resultados obtenidos con un sweep logarítmico de entre 1 y 10 kHz en 20  $\mu$ s. A la izquierda, se observa que contrastando los tiempos de detección anteriores con los obtenidos mediante correlación enventanada existen algunas variaciones, pero las desviaciones de las medidas son bajas incluso por debajo de 6.25 kHz, empezando a ser menos tolerables por debajo de 2.7 kHz. A la derecha, en primer lugar se observa que, tal como se predijo, las amplitudes de la señal directa y reflejada son distintas mientras la frecuencia está por encima unos 7 kHz de modo que, para frecuencias inferiores, el método estándar no permite una diferenciación entre ambas señales; en segundo lugar, midiendo con sweep sí existe una diferenciación en las amplitudes, con mayor diferencia hasta 3.5 kHz, pero distinguibles hasta los 2.7 kHz mencionados anteriormente.

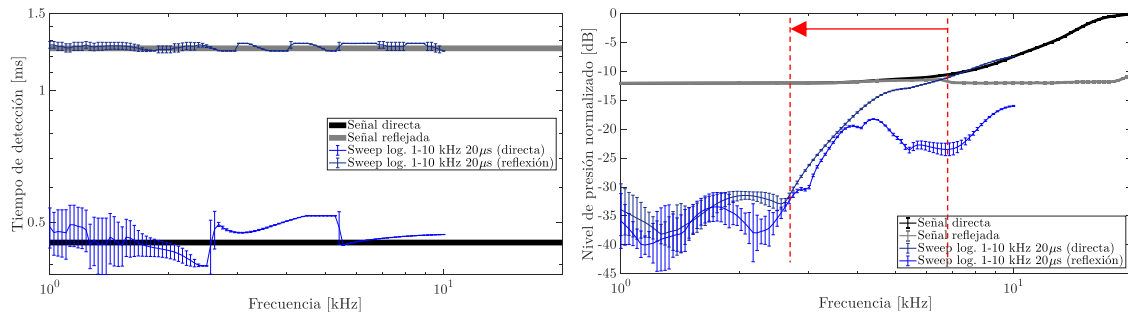


Figura 6. A la izquierda, tiempos de detección de la señal directa y reflexión para cada sweep de 1 a 10 kHz medido. A la derecha, amplitudes obtenidas mediante correlación cruzada enventanada.

## 5. Conclusiones y líneas futuras

De estos estudios preliminares de calibración con sweeps podemos concluir que:

- Para señales cuya frecuencia permita realizar medidas con el estándar IEC 60565, la técnica propuesta con sweeps permite una agilización de las medidas, reproduciendo resultados muy similares, con la ventaja de que el propio procesado facilita la detección de las señales.
- Para frecuencias inferiores a las establecidas por la infraestructura de medida (en este caso 6.25 kHz), es posible reducir discriminar la detección y amplitud de la señal directa respecto de la reflejada realizando medidas con sweeps de larga duración y el procesado propuesto. En estos experimentos se han podido alcanzar resultados significativos hasta 2.75 kHz.
- La validez del procesado propuesto y la ecuación (3) depende del número de ventanas utilizadas (cuanto mayor sean, mayor resolución frecuencial obtendremos) y del ancho  $\sigma$  de la misma (cuanta más ancho, mejor detección, pero mayor ancho de banda) de modo que para cada sweep, hay que conseguir un compromiso entre ambos parámetros de análisis.

Los trabajos actuales y futuros del CTN para consolidar esta línea de trabajo versarán en ampliar el conjunto de sweeps estudiado y, con ello, mejorar las técnicas de procesado para permitir una discriminación a más bajas frecuencias. Asimismo, se están empleando técnicas de medidas mediante emisión directiva paramétrica en baja frecuencia.

## Agradecimientos

Estos estudios se han realizado dentro del proyecto "NTP-f, Nuevas Técnicas de Procesado en baja frecuencia", subvencionado por el Instituto de Fomento (INFO) de la Región de Murcia bajo el Programa de ayudas dirigidas a Centros Tecnológicos de la Región de Murcia destinada a la realización de actividades I+D de carácter no económico. Modalidad 1: Proyectos I+D Independiente, con el Nº Expediente: 2017.08.CT01.0042.

## Bibliografía

- [1] Acústica submarina. Hidrófonos. Calibración en el rango de frecuencias de 0,01 a a 1 MHz (IEC 60565:2006). (Ratificada por AENOR en mayo de 2007).
- [2] A. Enyakov y et al., «A Russian-Chinese international comparison of hydrophone calibration methods,» *Metrologia*, vol. 36, pp. 297-303, 1999.
- [3] P. Levin, Calibration of Hydrophones, Bruël and Kjaer, 1973.
- [4] J. Proakis y D. Monolakis, Tratamiento digital de señales, 4ª ed., Prentice Hall, 2000.
- [5] S. e. a. Adrián-Martínez, «Acoustic signal detection through the cross-correlation method in experiments with different signal to noise ratio and reverberation conditions,» *LNCS*, vol. 8629, pp. 66-79, 2015.
- [6] H. Sastry, «Calibration of Underwater Sound Transducers,» *Defence Science Journal*, vol. 33, nº 3, pp. 237-245, 1983.
- [7] A. Isaev, «Reduction of the Error of Hydrophone Calibration with Respect to the Field in a Hydroacoustic Tank by the Reciprocity Method,» *Acoustical Physics*, vol. 50, nº 5, pp. 628-637, 2004.





**FIA 2018**

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -  
TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**