



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN EMISOR
ACÚSTICO PARA EL DETECTOR SUBMARINO DE
NEUTRINOS KM3NeT

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: Quiroz Rangel, Carlos Alberto

Tutor/a: Martínez Mora, Juan Antonio

Cotutor/a: Ardid Ramírez, Miguel

Cotutor/a: Diego Tortosa, Dídac

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN EMISOR ACÚSTICO PARA EL DETECTOR SUBMARINO DE NEUTRINOS KM3NeT

Autor: **Quiroz Rangel, Carlos Alberto**

Directores:

Martínez Mora, Juan Antonio
Ardid Ramírez, Miguel

Codirector: **Diego i Tortosa, Dídac**

Resumen — KM3NeT es una estructura de investigación instalada en el Mar Mediterráneo que actualmente se encuentra en la primera fase de construcción, entre sus objetivos principales está la detección de neutrinos. Parte del sistema de posicionamiento de KM3NeT está conformado por emisores acústicos (Acoustic Beacons). En este trabajo se documenta la técnica de calibración en laboratorio utilizada en la etapa final del proceso de fabricación de estos sensores. Los resultados presentados están basados en una campaña de medidas de parámetros como el nivel de presión sonora, la directividad y el retardo electro-mecánico-acústico en dos entornos diferentes (tanque y piscina). Los diferentes análisis de estas medidas, técnicas de detección y observación de las distintas señales, ofrecen un estudio detallado del comportamiento individual de cada Acoustic Beacon antes de ser instalado en el telescopio de neutrinos, así como una comparación de resultados en los diferentes entornos.

Palabras claves: Acústica Submarina; Acoustic Beacon; Caracterización; KM3NeT.

Abstract — KM3NeT is a research infrastructure installed in the Mediterranean Sea that is currently in the first phase of construction, among its main objectives is the detection of neutrinos. Part of the KM3NeT positioning system consists of acoustic emitters (Acoustic Beacons). This paper documents the calibration technique used in the final stage of the fabrication process. The results presented are based on a campaign of measurements of parameters such as sound pressure level, directivity and electro-mechanical-acoustic delay in two different environments (laboratory tank and swimming pool). The different analyses of these measurements, detection techniques and observation of the different signals, provide a detailed study of the individual behavior of each Acoustic Beacon before installation, as well as a comparison of results in the different working environments.

Keys words: Underwater Acoustics; Acoustic Beacon; Characterization; KM3NeT.

Nota 1: Toda figura, tabla o ilustración en que no se indique la fuente de procedencia, se debe entender como elaboración propia.

Nota 2: La definición de variables usadas en las distintas ecuaciones aparecerán indicadas una sola vez a en todo este documento.

Autor: Quiroz Rangel, Carlos A.

e-mail: carquira@epsa.upv.es

Fecha de entrega: Julio 2022



Para ver una copia de esta licencia, visite:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
KM3NeT: Detector de Neutrinos Submarino en el Mar Mediterráneo	3
Sistema de Posicionamiento KM3NeT	5
Objetivos del TFG	6
II. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA SUBMARINA.....	7
Velocidad del sonido en agua.....	7
PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	8
Efecto de Absorción.....	8
Efecto de Atenuación (divergencia geométrica).....	10
Características de un transductor	11
Sistema Activo Emisor-Receptor.....	13
III. DESAROLLO EXPERIMENTAL	20
Acoustic Beacon	20
Medidas Experimentales	22
Instrumentación	23
Montaje en tanque: Laboratorio.....	24
Montaje en piscina: Tinglado Portuario.....	25
Sistema Activo Emisor-Receptor para la Caracterización.....	26
Características a Calibrar.....	26
IV. RESULTADOS.....	29
Directividad (DIR).....	29
Piscina	29
Tanque.....	30
Tiempo de Respuesta (Delay)	30
Piscina	31
Tanque.....	31
Nivel de Presión Sonora (SPL)	31
Piscina	32
Tanque.....	32
Cuadro comparativo de resultados SPL	33
V. CONCLUSIONES	34
BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXO I.....	38
ANEXO II	39
ANEXO III.....	40

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Para determinar la posición de un elemento bajo el agua no es posible utilizar señales del sistema GPS debido a la atenuación de las señales electromagnéticas que utiliza, este es uno de los motivos por los que en el fondo del mar se utilizan los ultrasonidos con la intención de calcular tiempos de vuelo de señal entre hidrófonos emisor y receptor y así estimar posiciones relativas. Este trabajo pretende caracterizar un tipo particular de emisor acústico (Acoustic Beacon) utilizado en el sistema de posicionamiento del telescopio de neutrinos KM3NeT, así como el desarrollo y metodología seguidos.

KM3NET: DETECTOR DE NEUTRINOS SUBMARINO EN EL MAR MEDITERRÁNEO

Los neutrinos, aunque abundan en el Universo (las más abundantes después de los fotones) son las partículas más difíciles de detectar, catalogadas como elementales en el *Modelo Estándar de la física de partículas*, algunas de sus propiedades son: el no poseer carga eléctrica, su masa es muy pequeña y su interacción se produce a través de la llamada *interacción débil* [1].

Otra de las características particulares de los neutrinos es que apenas interactúan con otras partículas, que sumado al no poseer carga les permite recorrer distancias astronómicas y atravesar grandes extensiones de materia sin que su trayectoria sea afectada por los campos electromagnéticos del Universo y sin sufrir ningún tipo de alteración. Esto los convierte en mensajeros idóneos y su estudio aporta valiosa información para la comprensión del universo sobre todo de las zonas más alejadas y que con otros mensajeros como rayos gamma (fotones de alta energía) o protones no es posible detectar.

Solo una pequeña porción de los Neutrinos que llegan a la Tierra procedentes de otras galaxias o estrellas interactúan y son posibles de detectar gracias a la *radiación de Cherenkov* que consiste en una luz generada durante su interacción con la materia (agua, hielo,...) generando un muón secundario con carga y que viaja a una velocidad relativista [2].

KM3NeT (Acrónimo de Telescopio de Neutrinos de kilómetro cúbico) es una estructura de investigación que consta de dos nodos de detección instaladas en el Mar Mediterráneo denominadas ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) instalado a 100 km de la costa de *Sicilia* (Italia) a una profundidad de 3.5 km y cuyo principal objetivo es la astronomía de neutrinos, y ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) instalado a 40 km de la costa de *Tolón* (Francia) a una profundidad de 2.5 km. (ver figura 1) con un diseño más compacto y con objetivo principal el estudio de oscilaciones y propiedades de los neutrinos.

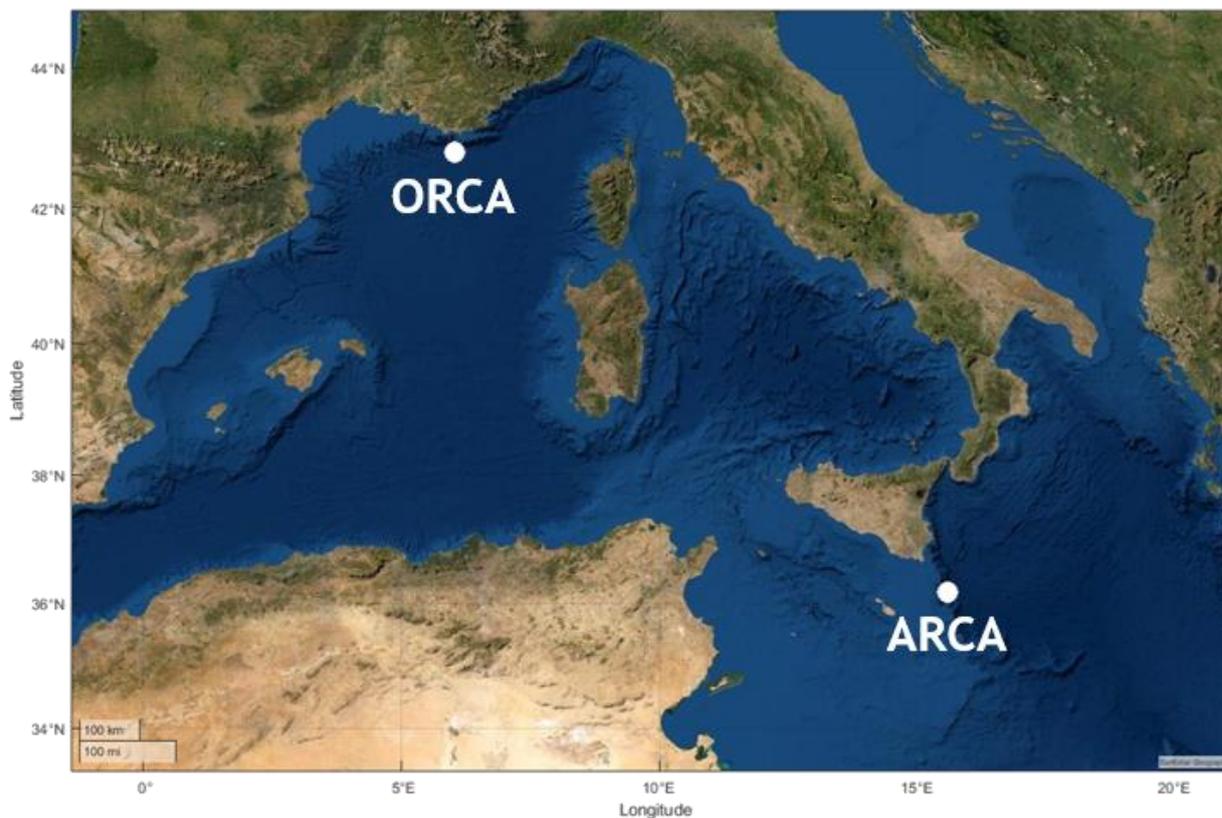


Figura 1. Ubicación de los nodos de detección ORCA y ARCA de KM3NeT.

El telescopio contará con más de 300 Unidades de Detección (DUs). Una DU se compone de su base, anclada al fondo marino, una boya que permite la flotabilidad de la línea que las une, y 18 Módulos Ópticos Digitales (DOMs) dispuestos a lo largo de la línea. Los DOMs están equipados con detectores de luz ultrasensibles con los cuales se captará la luz de Cherenkov generada durante la interacción de los neutrinos (ver figura 2).

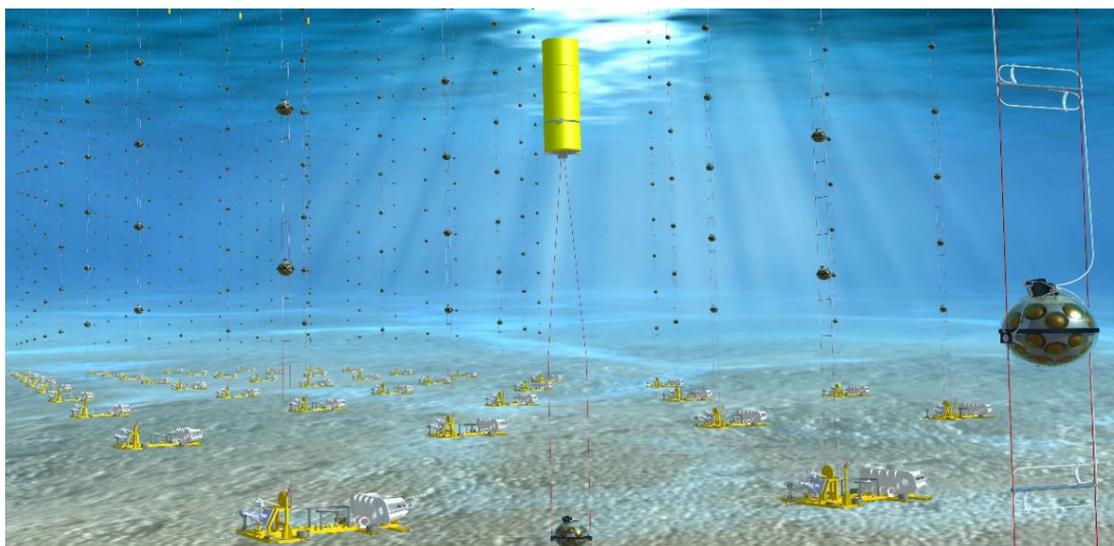


Figura 2. Distribución Telescopio KM3NeT [3].

Algunas diferencias entre la configuración de ARCA y ORCA es el tamaño, en el primero la línea desplegada tiene una longitud de aproximadamente 705 metros y en el segundo de 197 metros, por otra parte, la separación entre DUs en ARCA es de 90 metros y en ORCA de 20 metros (ver figura 3).

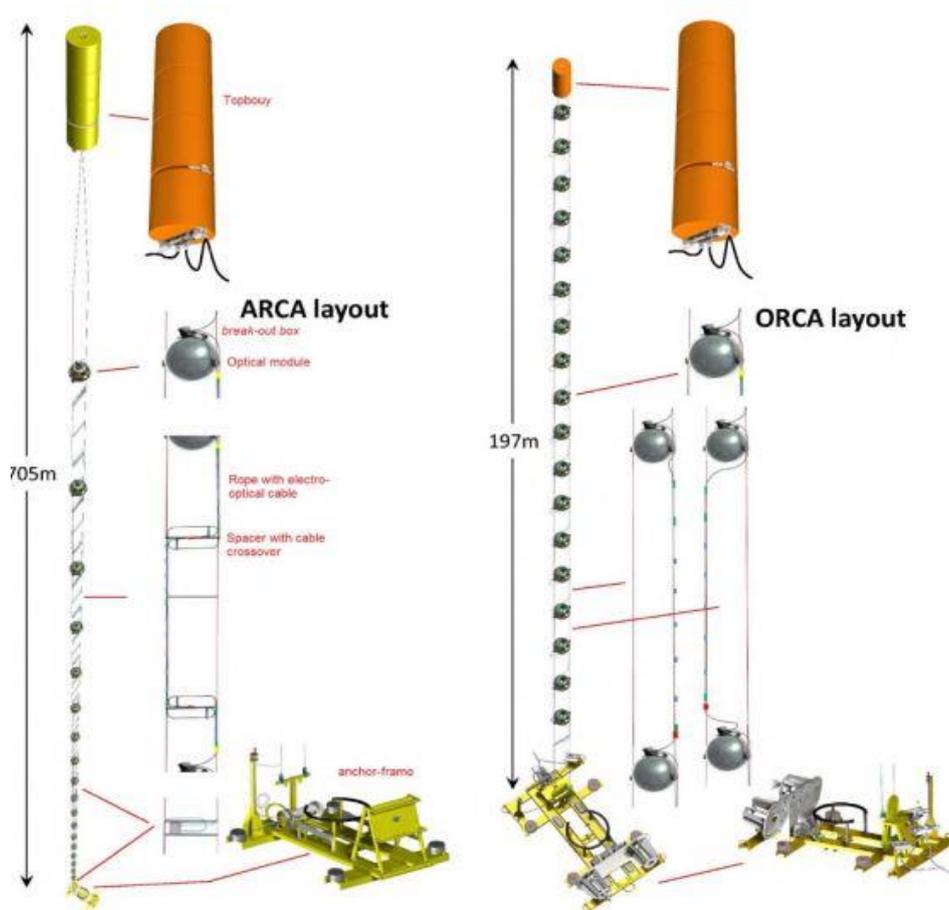


Figura 3. Estructura de las unidades de detección en ORCA y ARCA [3]

Sistema de Posicionamiento KM3NeT

El sistema de posicionamiento en KM3NeT tiene como objetivo principal monitorizar la posición y orientación de cada Módulo Óptico Digital (DOM). Las corrientes marinas producen desplazamientos en las líneas de detección (DU) y por tanto en los DOMs. Conocer la posición exacta de los detectores en el momento en que es registrada una interacción es necesario para poder determinar el camino recorrido por el neutrino y reconstruir su trayectoria original y así determinar de qué zona del universo proviene.

El sistema de posicionamiento consta de la combinación de un Sistema de Posicionamiento Acústico (APS) que determina la posición y un sistema adicional que determina la orientación (AHRS) de cada DOM

El APS se compone de emisores llamados Acoustic Beacon (ABs) anclados al fondo marino que tienen una posición fija y conocida, y receptores llamados Digital Acoustic Receivers (DARs) de los que hay dos tipos: los llamados internos, piezocerámicos dentro de cada DOM, y los externos, hidrófonos que permanecen fijos en la base de cada DU a una distancia fija de los ABs (ver figura 4).

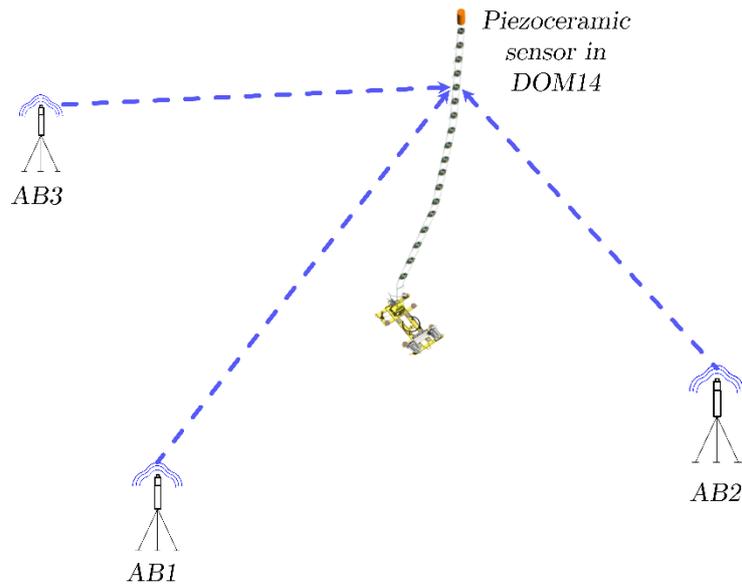


Figura 4. Configuración del sistema APS de KM3NeT.

La posición de cada DOM se consigue mediante la triangulación de señales acústicas emitidas desde los ABs que son recibidas en cada DU (hidrófono) y cada DOM (piezoeléctrico).

Acoustic Beacons (ABs) de KM3NeT han sido diseñados por la UPV [4] y se producen gracias a una colaboración entre la UPV y la empresa Mediterráneo de Señales Marítimas (MsM) [5]. Estos se producen bajo demanda de KM3NeT aunque pueden tener utilidad para otras aplicaciones submarinas. Antes de ser instalados en el APS de KM3NeT, Se calibran y caracterizan en laboratorios de la UPV, y así se completa una ficha de datos individual, donde se indica la potencia, los niveles de presión sonora, la directividad y el retardo del sensor.

OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo principal de este trabajo es la descripción de la metodología utilizada en el proceso de calibración de los Acoustic Beacon (ABs) y los resultados obtenidos en el proceso de calibración en laboratorio de uno de ellos en la que se caracterizaron parámetros de directividad, potencia de emisión y retardo de respuesta. Se reporta tanto la técnica como la calibración en dos entornos diferentes, piscina y tanque. El tanque supone una mayor comodidad para medir, dada sus dimensiones (más manejables) y que se encuentra en un laboratorio común de la UPV, mientras que la piscina situada en los tinglados del puerto de Gandía ofrece un entorno más libre de posibles reflexiones, pero alarga el tiempo en las campañas de medida. En este TFG se va a medir un mismo AB en ambos entornos y se estudiarán los resultados obtenidos y las diferencias entre ellos.

Este trabajo se compone de 5 capítulos:

- El capítulo I *Introducción y objetivos* en el que nos encontramos y hemos descrito tanto la motivación como el propósito del presente trabajo, así como la metodología a seguir.
- El capítulo II *Fundamentos de Acústica Submarina* en el que se da un repaso a conceptos teóricos y nociones de la acústica submarina relacionados con el desarrollo del trabajo.

- El capítulo III *Desarrollo Experimental* detalla la metodología, medidas realizadas, instrumentación y descripción de entornos de trabajo utilizados.
- El capítulo IV *Resultados* en el que se presentan los datos obtenidos durante el desarrollo experimental.
- El capítulo V *Conclusiones* en el que se comentan los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegan durante la realización del trabajo.

II. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA SUBMARINA

El sonido lo podemos definir como la propagación a través de un fluido de una perturbación mecánica en forma de onda resultado del movimiento vibratorio de las moléculas de una sustancia elástica, en nuestro caso el agua.

VELOCIDAD DEL SONIDO EN AGUA

La velocidad del sonido (c) en el agua depende de la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), salinidad S (g/L) contenido de ClNa en gramos litro o bien S (‰) en partes por mil y la presión que es proporcional a la profundidad z (m). Para el cálculo de dicha velocidad hemos utilizado las siguientes expresiones:

- La propuesta por (Medwin, 1975) [6]:

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,16z \quad (1)$$

válida para valores $0 < T < 35$ $^{\circ}\text{C}$, $0 < S < 45$ ‰ , $0 < z < 1000$ m , que se ajustan a las condiciones de las mediciones realizadas en laboratorio.

- La propuesta por (Mackenzie, 1981) [7]:

$$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4}T^3 + 1,340 \cdot (S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2} \cdot z + 1,675 \cdot 10^{-7} \cdot z^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} \cdot T(S - 35) - 7,13 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot z^3 \quad (2)$$

válida para valores $0 < T < 30$ $^{\circ}\text{C}$, $30 < S < 40$ ‰ , $0 < z < 8000$ m , que se ajustan con la ubicación de KM3NeT.

En la siguiente tabla se registran valores teóricos de velocidades del sonido en las condiciones de los entornos de medida utilizados en el desarrollo de este trabajo (ver tabla 1).

	Profundidad z [m]	T [$^{\circ}\text{C}$]	pH	S [‰]	f [kHz]	c [m/s]
Tanque	0.33	16.00	8.5	0	30	1469.2
Piscina	0.,49	9.05	8.5	0	30	1445.2

Tabla 1. Velocidades teóricas del sonido en agua

En la siguiente tabla comparativa tenemos ejemplos de velocidad del sonido en el agua, obtenida con datos extraídos de las plataformas ORCA y ARCA [2] (ver tabla 2).

		Profundidad z [m]	T [°C]	pH	S [‰]	f [kHz]	c [m/s]
ORCA	DOM 18	2215	15.0	7.90	37	30	1545.9
	BASE	2400	15.0	7.90	37	30	1549.0
ARCA	DOM 18	2800	13.2	8.15	38,5	30	1551.8
	BASE	3500	13.2	8.15	38,5	30	1563.8

Tabla 2. Ejemplos velocidades teóricas del sonido en el mar (ubicación KM3NeT)

PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

En un fluido las pérdidas de propagación de una onda acústica son debidas principalmente a dos fenómenos: el efecto de absorción y la divergencia geométrica.

EFEECTO DE ABSORCIÓN

Durante la propagación en forma de onda, la energía mecánica del sonido es absorbida por el medio, absorción debida a la fricción entre la onda propagada y el medio la cual se transforma en calor. La absorción entonces dependerá de las características del propio medio y de la frecuencia del sonido. En el agua de mar la energía se disipa a través de:

- La viscosidad del agua pura
- La reacción de las moléculas de sulfato de magnesio (MgSO_4), a partir de los 100 kHz.
- La reacción de las moléculas de ácido bórico (B(OH)_3), a partir de 1 kHz.

El modelo más utilizado para el cálculo del coeficiente de absorción α ($\frac{dB}{km}$) es el propuesto por (François y Garrison, 1982) [8,9] basado en una gran cantidad de resultados experimentales y estudios teóricos que define:

$$\alpha \left[\frac{dB}{km} \right] = A_1 P_1 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + A_2 P_2 \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (3)$$

la contribución del ácido bórico (B(OH)_3) que corresponde al primer término se obtiene mediante: [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = \frac{8.86}{c} 10^{(0.78pH-5)} \\ P_1 = 1 \\ f_1 = 2.8 \sqrt{\frac{S}{35}} 10^{(4-\frac{1245}{T+273})} \end{array} \right. \quad (4)$$

donde $c = 1412 + 3.21T + 1.19S + 0.0167z$.

La contribución del sulfato de magnesio (MgSO_4) que corresponde al segundo término se obtiene mediante: [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025T) \\ P_2 = 1 - 1.37 \cdot 10^{-4}z + 6.2 \cdot 10^{-9}z^2 \\ f_2 = \frac{8.17 \cdot 10^{\left(8 - \frac{1990}{T+273}\right)}}{1 + 0.0018(S - 35)} \end{array} \right. \quad (5)$$

La contribución de la viscosidad el agua pura que corresponde al tercer término se obtiene mediante: [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} T < 20^\circ C \rightarrow P_3 = 1 - 3.83 \cdot 10^{-5}z + 4.9 \cdot 10^{-10}z^2 \\ A_3 = 4.937 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5}T + 9.11 \cdot 10^{-7}T^2 - 1.5 \cdot 10^{-8}T^3 \\ T > 20^\circ C \rightarrow A_3 = 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5}T + 1.45 \cdot 10^{-7}T^2 - 6.5 \cdot 10^{-10}T^3 \end{array} \right. \quad (6)$$

T = Temperatura [°C], S = Salinidad [‰], z = Profundidad [m], f = Frecuencia [kHz].

Algunos ejemplos de valores de absorción obtenidos utilizando las anteriores ecuaciones y con datos proporcionados por el entorno KM3NeT [3] son los siguientes (ver tabla 3):

		Profundidad z [m]	T [°C]	pH	S [‰]	f [kHz]	$\alpha \left[\frac{dB}{km} \right]$
ORCA	DOM 18	2215	15.0	7.90	37	30	0.2144
	BASE	2400	15.0	7.90	37	30	0.2128
ARCA	DOM 18	2800	13.2	8.15	38,5	30	0.2167
	BASE	3500	13.2	8.15	38,5	30	0.2160

Tabla 3. Ejemplos de valores teóricos del coeficiente de absorción.

En las siguientes figuras se representan datos teóricos estimados a partir de las fórmulas presentadas y aplicadas a la plataforma KM3NeT. Se estiman para una frecuencia de 30 kHz donde vemos la relación entre la presión (dependiente de la profundidad) y la velocidad de propagación (ver figura 5) donde a mayor presión tenemos una mayor velocidad de propagación. Por otra parte, tenemos la relación entre presión y absorción donde vemos como a mayor presión el coeficiente de absorción disminuye (ver figura 6).

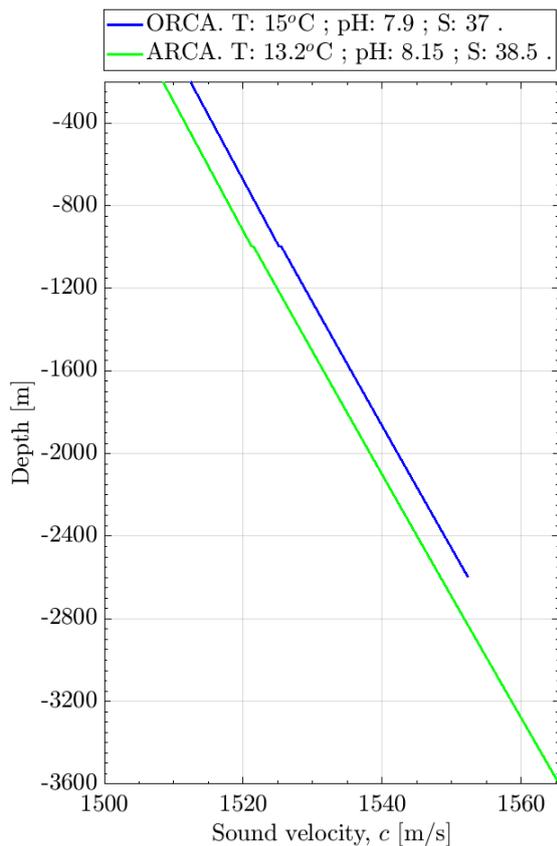


Figura 5. Relación presión - velocidad de propagación

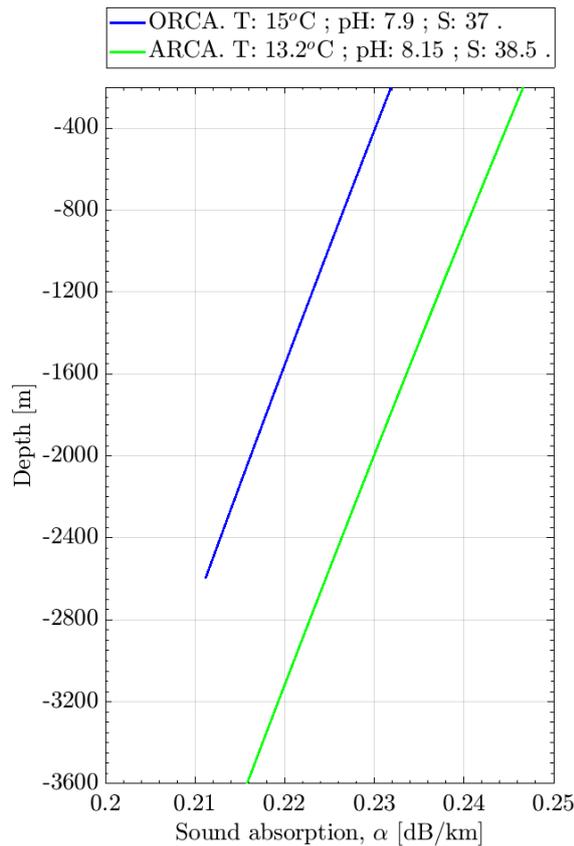


Figura 6. Relación presión - coeficiente de absorción.

EFFECTO DE ATENUACIÓN (DIVERGENCIA GEOMÉTRICA)

Una onda acústica se propaga desde la fuente de sonido dispersando la energía transmitida en un frente de onda cada vez mayor (ver figura 7.a). La intensidad acústica I entendida como el flujo de energía por unidad de superficie y tiempo decrece proporcionalmente al inverso de la superficie S (ver Figura 7.b) [10]:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{4\pi R_1}{4\pi R_2}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad (7)$$

Donde R_i es la distancia radial medida desde la fuente al punto receptor. La intensidad I decrece $\frac{1}{R^2}$ y la presión decrece $\frac{1}{R}$ ya que la relación entre la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión es:

$$I \sim P^2$$

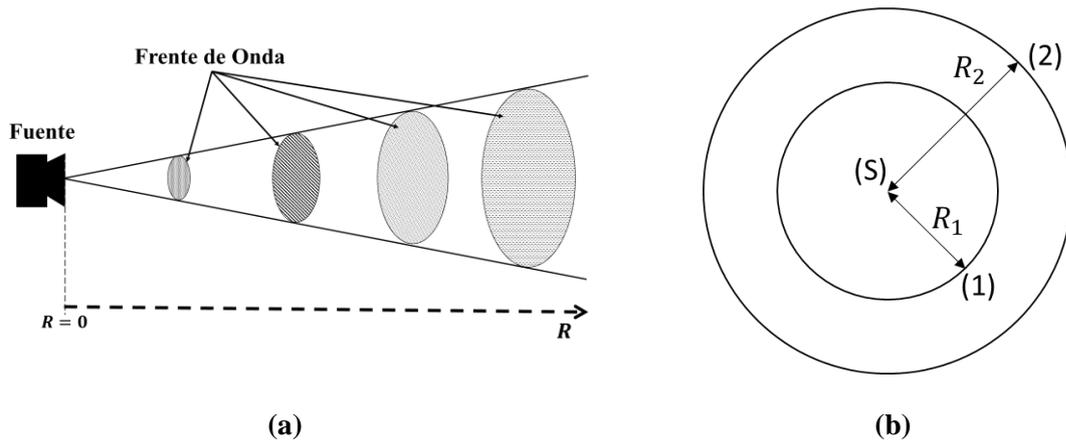


Figura 7. Divergencia Geométrica.

Utilizando los conceptos anteriormente mencionados podemos calcular la presión a cualquier distancia (r) del emisor (P_r) en el mismo fluido partiendo de la Amplitud (A) a una distancia de referencia conocida (d) [11]:

$$P_r = A \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} = P_{rec,d} \cdot d \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha(r-d)} \quad (8)$$

Así se aplica el efecto de divergencia ($\frac{1}{r}$) y absorción ($e^{-\alpha(r-d)}$) a la presión recibida a una distancia d ($P_{rec,d}$).

CARACTERÍSTICAS DE UN TRANSDUCTOR

Los hidrófonos son transductores diseñados para transformar presión acústica en señales eléctricas y viceversa. Podemos caracterizar un transductor mediante las medidas de su admitancia y su directividad, entre otras.

Admitancia de un Transductor

Admitancia eléctrica (Y) es la inversa de la impedancia (Z) que corresponde a la facilidad con la que se mueven los electrones por un circuito eléctrico que tiene como unidad los Siemens (S o Ω^{-1}). La admitancia presenta máximos en la frecuencia de resonancia del transductor. La frecuencia de resonancia corresponde a la frecuencia en la que la amplitud de la vibración del piezoeléctrico (parte del transductor) es máxima, de tal manera que conociendo la admitancia del transductor podemos obtener su frecuencia de resonancia (ver figura 8). Para este trabajo se utilizó el analizador de impedancias HIOKY IM 3570 (ver figura 9) para caracterizar cada uno de los transductores instalados en los Acoustic Beacon previamente a su montaje, con el fin de registrar su valor de admitancia y su frecuencia de resonancia.

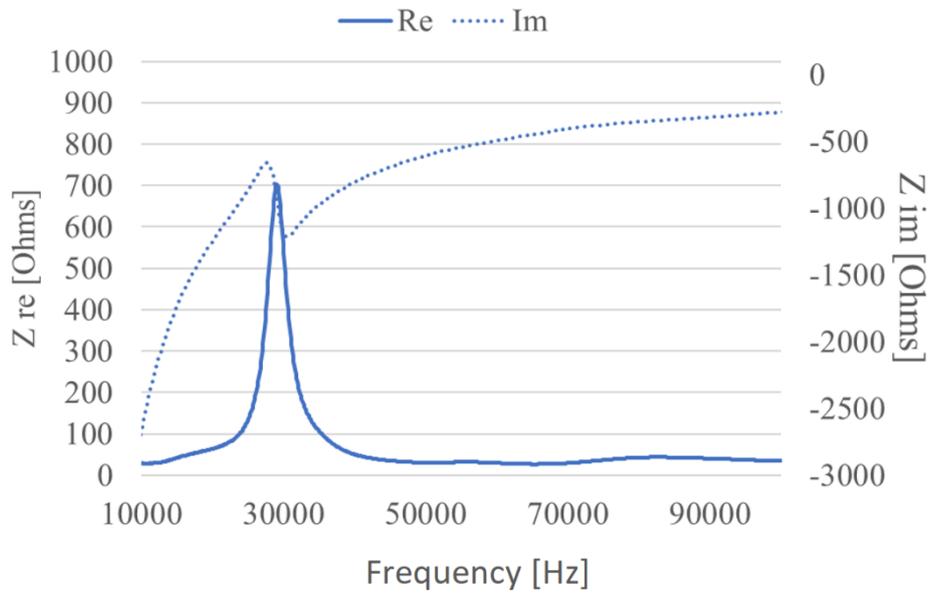


Figura 8. Ejemplo de medida de frecuencia de resonancia en aire. Re e Im son la parte real e imaginaria de Z

Se comprueba que la frecuencia de resonancia en aire de los transductores acústicos en los AB de KM3NeT es de 30 kHz.

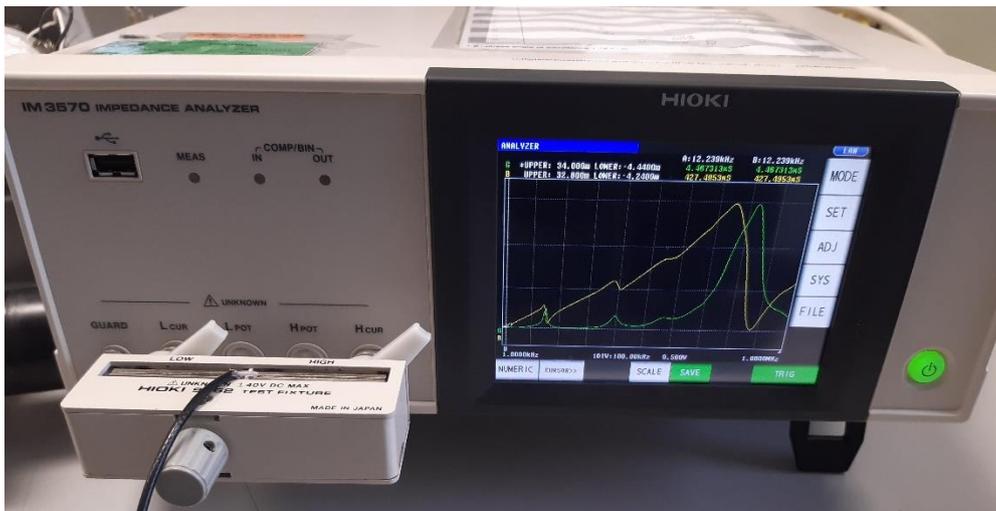


Figura 9 Analizador de Impedancias modelo HIOKY IM 3570.

DIRECTIVIDAD

Se define la directividad $D(\theta)$ de una fuente como el módulo entre la presión eficaz P a una distancia r_0 , posición angular θ y una presión eficaz P_0 de referencia que suele ser la máxima que produce la fuente y que coincide generalmente con la presión que se provoca en el eje de simetría de la fuente. Según esto:

$$D(\theta) = \left| \frac{P(\theta)}{P_{max}} \right| \rightarrow D_{dB} = 20 \log \frac{P(\theta)}{P_{max}} \tag{9}$$

La representación de la directividad, bien en escala lineal o logarítmica conduce a los diagramas direccionales de las fuentes, de uso extendido para el cálculo de los niveles de presión sonora [12].

SISTEMA ACTIVO EMISOR-RECEPTOR

Si tenemos una señal emitida por una fuente específica que podemos regular y configurar, y a su vez controlamos la recepción de forma síncrona decimos que tenemos un sistema activo.

Con este tipo de sistemas buscamos una señal recibida registrada mediante datos crudos (sin ningún tipo de procesamiento). El medio de propagación afecta la señal transmitida mediante los fenómenos anteriormente descritos, tener caracterizado dicho medio permite entender su contribución en los datos recibidos. Ambientes controlados como lo puede ser un laboratorio facilita esta tarea.

En nuestro estudio contamos con un Sistema Activo Acústico en el que se analiza la señal recibida donde podemos obtener:

- La estimación del tiempo de vuelo ToF, gracias al control del tiempo de emisión ToE y el posterior registro del tiempo de llegada ToA
- La estimación de la amplitud de la señal recibida, gracias al análisis de los datos crudos grabados

Estimación del tiempo de llegada ToA (Time of Arrival)

El tiempo de propagación en una dirección de una señal que viaja entre una fuente y un receptor se conoce como tiempo de vuelo o por sus siglas en inglés ToF. El ToF es entonces la diferencia entre el instante de tiempo en el que se inicia la emisión de la señal por sus siglas en inglés ToE y el instante de tiempo en la que registramos su llegada al receptor ToA [13]. El medio de transmisión normalmente tiene fronteras, en el caso del mar el fondo marino y la superficie, en tanque y piscina los respectivos contornos que producen una serie de reflexiones o multitrayectos de la onda inicialmente emitida que igualmente llegan al receptor y es necesario poder diferenciar de la señal original (señal directa). En el

siguiente esquema se muestra la configuración del sistema emisor – receptor, así como el trayecto de diferentes ondas reflejadas en el tanque del laboratorio (ver figura 10).

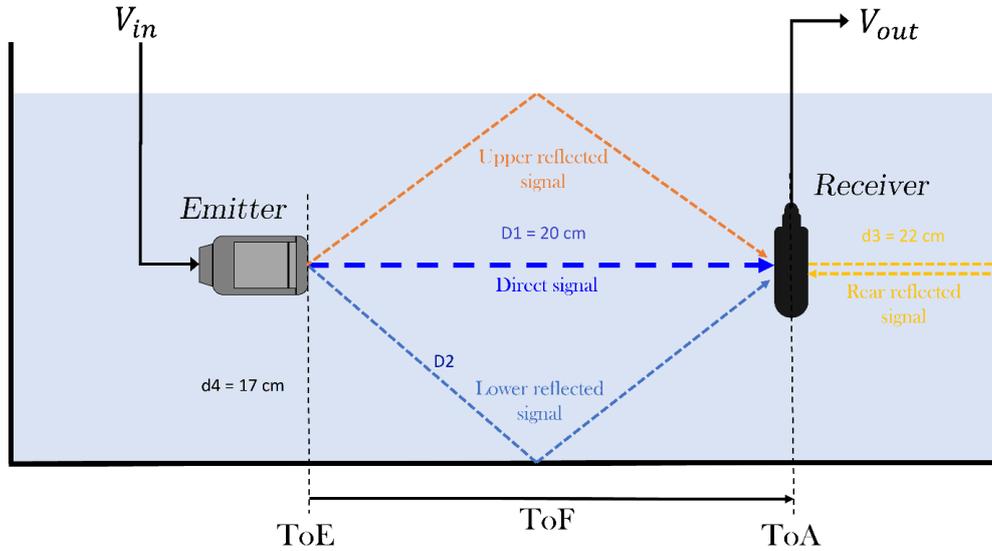


Figura 10. Esquema sistema emisor - receptor

En el esquema anterior tenemos una distancia $D1$ (señal directa), una distancia $2 \cdot D2$ (señal reflejada en el fondo del tanque), una distancia $D1 + 2 \cdot d3$ (señal reflejada en pared posterior del tanque), $d4$ (distancia entre emisor y el fondo del tanque). Conocidas $D1$, $d4$ y $d3$ tenemos:

$$D2 = \sqrt{17^2 + 10^2} = 19.72 \text{ cm} \quad (10)$$

Podemos entonces calcular los tiempos de vuelo de la señal directa ($ToF_{S.direct}$), reflejada en fondo ($ToF_{S.D2}$) y reflejada en la pared posterior del tanque ($ToF_{S.d3}$):

$$ToF_{S.direct} = \frac{0.2 \text{ m}}{1469.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 136.1 \mu\text{s} \quad (11)$$

$$ToF_{S.D2} = \frac{(0.1972 \cdot 2) \text{ m}}{1469.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 268.4 \mu\text{s} \quad (12)$$

$$ToF_{S.d3} = \frac{(0.2 + 0.22 \cdot 2) \text{ m}}{1469.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 435.6 \mu\text{s} \quad (13)$$

Por lo tanto, si recibimos la primera reflexión a partir de $ToF_{S.D2}$, esperamos tener una ventana de tiempo de señal directa libre de reflexiones correspondiente a:

$$ToF_{S.D2} - ToF_{S.direct} = 268.4 - 136.1 = 132.3 \mu\text{s} \quad (14)$$

De forma análoga, cuando realizamos las medidas en la piscina del puerto donde la distancia entre el emisor y el fondo es de $d_4 = 51$ cm. La señal directa dista $D_1=100$ cm, calculamos una distancia de señal reflejada en el fondo $D_2= 71.4$ cm. No se tendrá en cuenta la señal reflejada en la pared posterior de la piscina porque la distancia es mucho mayor y en consecuencia el tiempo también, resumiendo:

$$ToF_{S.direct} = \frac{1 \text{ m}}{1445.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 691.9 \mu\text{s} \quad (15)$$

$$ToF_{S.D_2} = \frac{(0.714 \cdot 2) \text{ m}}{1469.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 988.0 \mu\text{s} \quad (16)$$

En la piscina se dispondrá de una ventana de tiempo de señal directa libre de reflexiones de:

$$ToF_{S.D_2} - ToF_{S.direct} = 988.0 - 691.9 = 296.1 \mu\text{s} \quad (17)$$

En el análisis de los datos sin procesar grabados, para obtener el ToA, se van a utilizar los siguientes métodos:

- *Método de Threshold*, consiste en un proceso básico que se basa en determinar el instante en que empezamos a detectar presencia de señal. Este método necesita una buena Relación Señal Ruido (SNR) y un estudio de la señal emitida para poder determinar un valor óptimo de umbral (nivel mínimo de señal), ya que en muchas ocasiones se necesita un filtrado para asegurar registrar la señal de interés con mayor exactitud
- *La Transformada de Variación de Potencia (Pvar)*, es un proceso que igualmente exige una buena (SNR), y a veces la necesidad de filtrado, y presenta dos variantes:
La primera calcula la frecuencia acumulada de los valores absolutos de la señal recibida para obtener una *Señal Pvar acumulativa* en la que los valores están elevados a un factor para obtener un cambio de pendiente (entre la señal y el ruido) más abrupto que indicará el ToA.

$$pvar_{acumulativa}[n] = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^k}{\sum x[n]^k} \quad (18)$$

La segunda variante usa la suma acumulativa de los elementos de la señal y resta su promedio obteniendo una señal tipo sierra en la que tenemos en consideración la aportación del ruido de fondo (*Noise [n]*) en la señal recibida, evitando quizá el uso de filtrado:

$$Noise[n] = a \cdot t[n] + b \quad (19)$$

Donde a y b representan los coeficientes resultantes del ajuste lineal de $pvar_{acumulativa}$, y $t[n]$ representa el vector temporal de la señal en modo discreto.

$$pvar_{sierra}[n] = pvar_{acumulativa}[n] - Noise[n] \quad (20)$$

En las siguientes gráficas se presentan ejemplos de estimación del ToA con los métodos anteriormente descritos analizando una señal recibida experimental grabada en un tanque de agua reflectante. La señal es un seno de 50 kHz y 100 μ s de duración medida a una distancia de 20 cm entre emisor-receptor (ver figura 11).

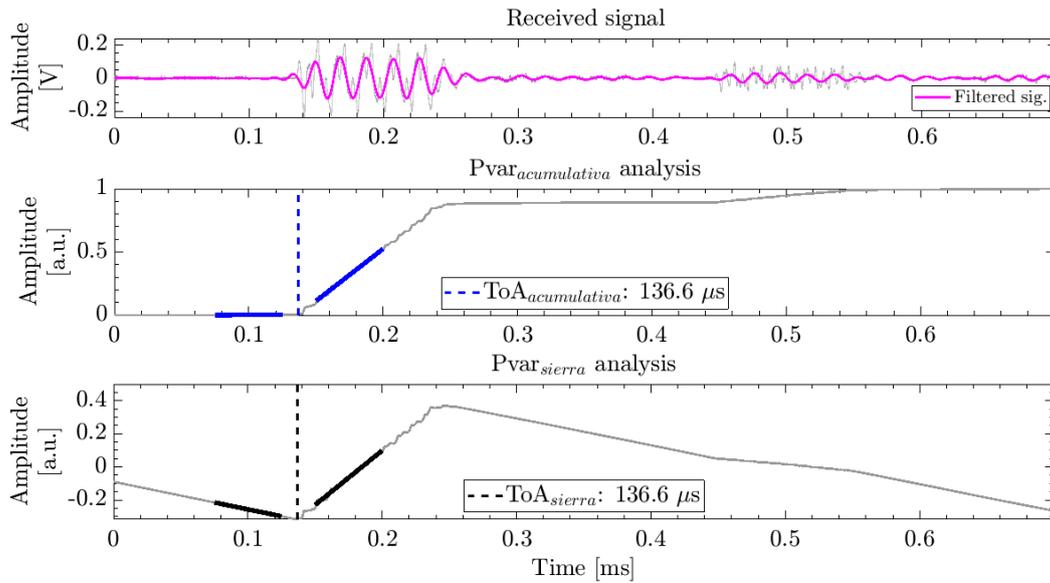


Figura 11 Estimación ToA utilizando el método PVAR

En la gráfica anterior el resultado de los dos métodos de cálculo de ToA es el mismo, sin embargo, se pueden presentar casos en donde se mezcla la señal directa con la reflejada especialmente en bajas frecuencias donde los resultados presentan pequeñas diferencias.

De la misma manera si comparamos con el ToA teórico (esperado) de 136.1 μ s (con una velocidad de 1469 [m/s]) las diferencias son de menos de 1 μ s.

- *Método de Correlación*, este método usa la similitud entre dos señales [14]. La función r_{xy} en la ecuación 21 indica la similitud entre las señales correladas [15]:

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(x + \tau)y^*t(dt) \rightarrow r_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]y[n - l] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n + l]y[n] \quad (21)$$

Los picos de amplitud en la señal de correlación ($r_{xy}(\tau)$) empezarán a ser mayores en el momento en que coinciden las dos señales (emitida y recibida) proporcionando una aproximación al ToA en su pico máximo.

Una diferencia con los métodos mencionados anteriormente es que este es efectivo con SNR bajos (y sin necesidad de filtrado previo), y presenta mejores resultados con señales tipo (de barrido en frecuencia) que son el tipo de señal con que trabajan los ABs.

Estimación de la amplitud de la señal recibida

Una vez conocido el instante en que llega la señal al receptor ToA, podemos estimar la amplitud de esta. La estimación de amplitud de señal se realizó en el dominio del tiempo, frecuencia y correlación para un tono de 30 kHz de 1.5 V de pico ideal (sin ruido añadido):

- *Por Tiempo*, a la señal de interés ($x[n]$) le eliminamos el offset restando su valor medio (ver figura 12), luego promediamos la amplitud de pico o formato *Root Mean Square* (RMS) mediante las siguientes ecuaciones:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{\sum x^2[n]}{N}} \tag{22}$$

$$A_{peak} = A_{rms}\sqrt{2} \tag{23}$$

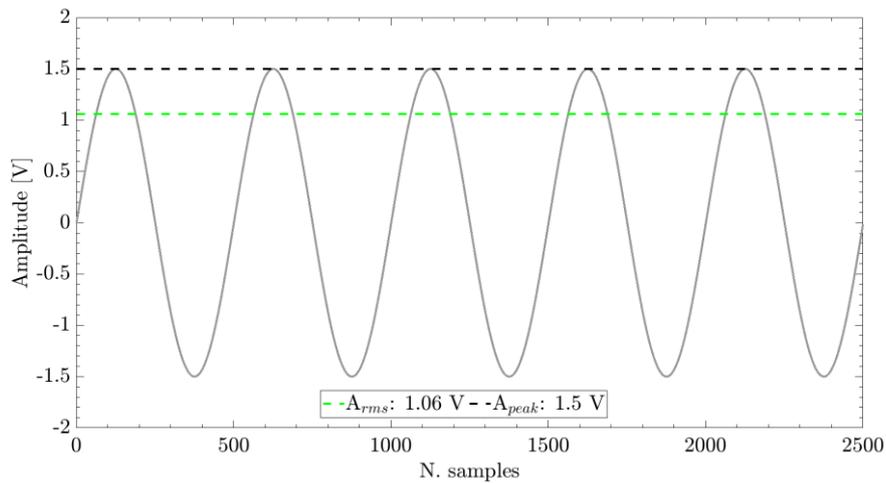


Figura 12. Estimación de la amplitud en el dominio del tiempo.

- *Por Frecuencia*, consiste en transformar la señal recibida en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), esta aproximación es aplicable a señales sinusoidales como en algunos de nuestros casos (ver figura 13).

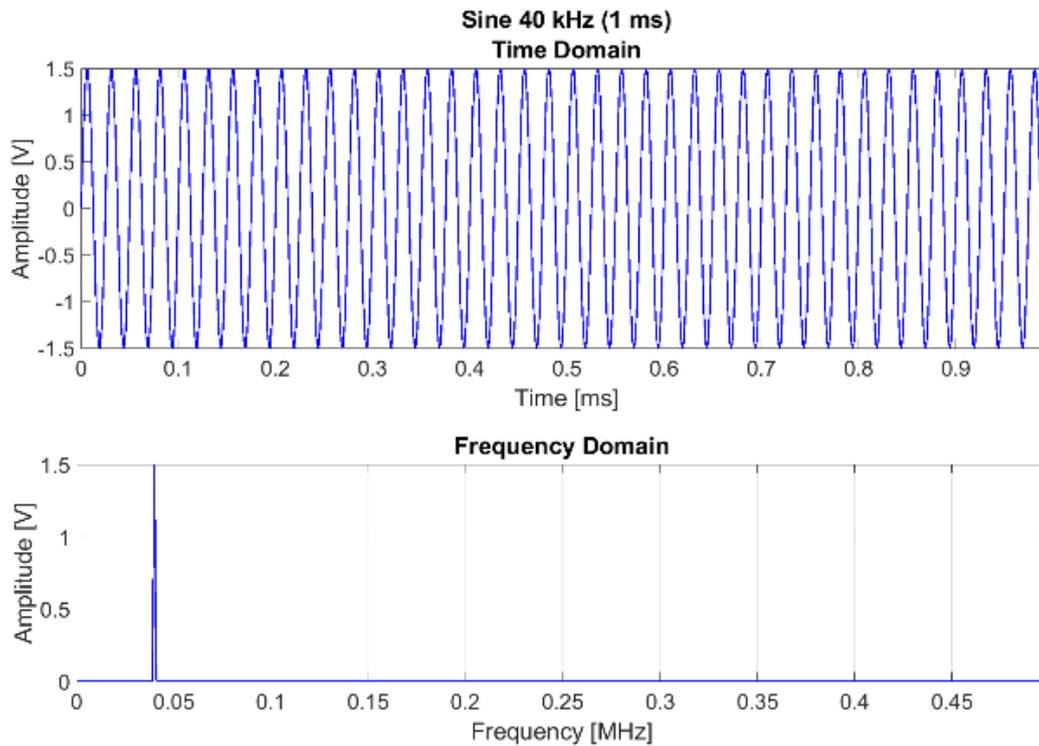


Figura 13 Estimación de la amplitud en el dominio de la frecuencia.

- Por correlación, a partir de la señal resultante de la correlación entre la señal enviada que conocemos y la recibida, obtenemos un ToA correspondiente al pico (punto de mayor coincidencia) así como una amplitud máxima de correlación (en unidades de correlación, A_{corr}), con este último podemos estimar una amplitud de pico expresada en voltios mediante la siguiente expresión [15] :

$$V_{corr} = \frac{2 A_{corr}}{N_{send}} \quad (24)$$

Donde N_{send} es la longitud, en número de muestras, de la señal enviada.

En la siguiente gráfica se observan los resultados de estimar la amplitud de la misma señal utilizando el método de correlación. Tenemos una señal enviada (“sine sweep” de 30 a 32 kHz y duración 1 ms) y una señal recibida simulada (sin ruido) a las que correlamos entre sí. Mediante el valor pico de la señal de correlación y la ecuación 9 obtenemos una estimación de la amplitud (ver figura 14).

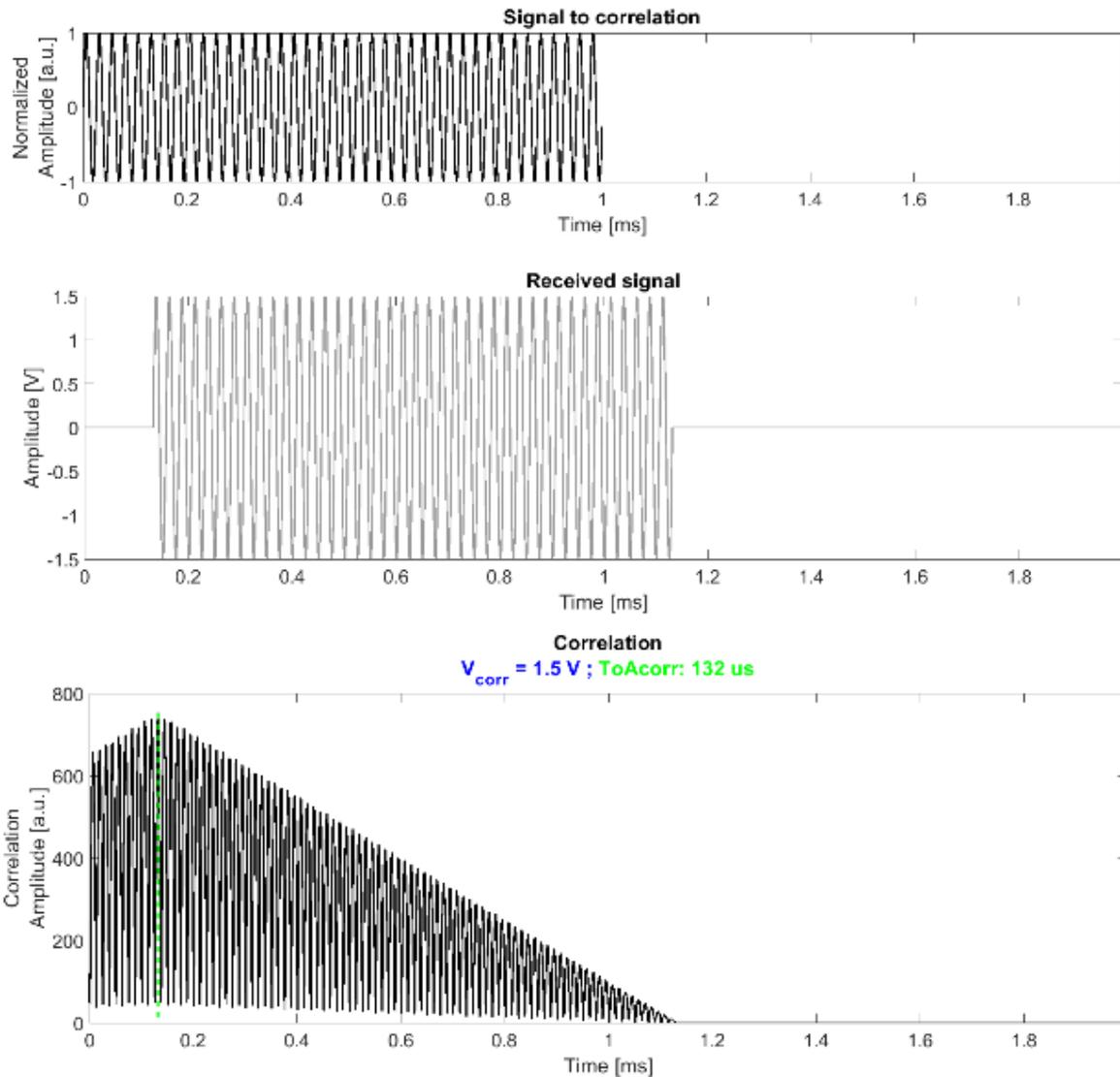


Figura 14 Estimación de la amplitud de señal.

Es de resaltar que la metodología descrita en los tres métodos es probada con señales ideales dando por resultado valores exactos, sin embargo cuando trabajamos con señales experimentales que incluyen ruido y afectación del medio de transmisión es apropiado recortar la señal recibida evitando trabajar con el periodo de transición de la misma y utilizar solo la zona estable como en el siguiente ejemplo en el que a la señal experimental emitida de 5 periodos recortamos el primero, zona de color morado (ver figura 15). A cada señal grabada se aplican los tres métodos de análisis para estimación del ToA y de la amplitud que posteriormente nos permitirá comparar resultados.

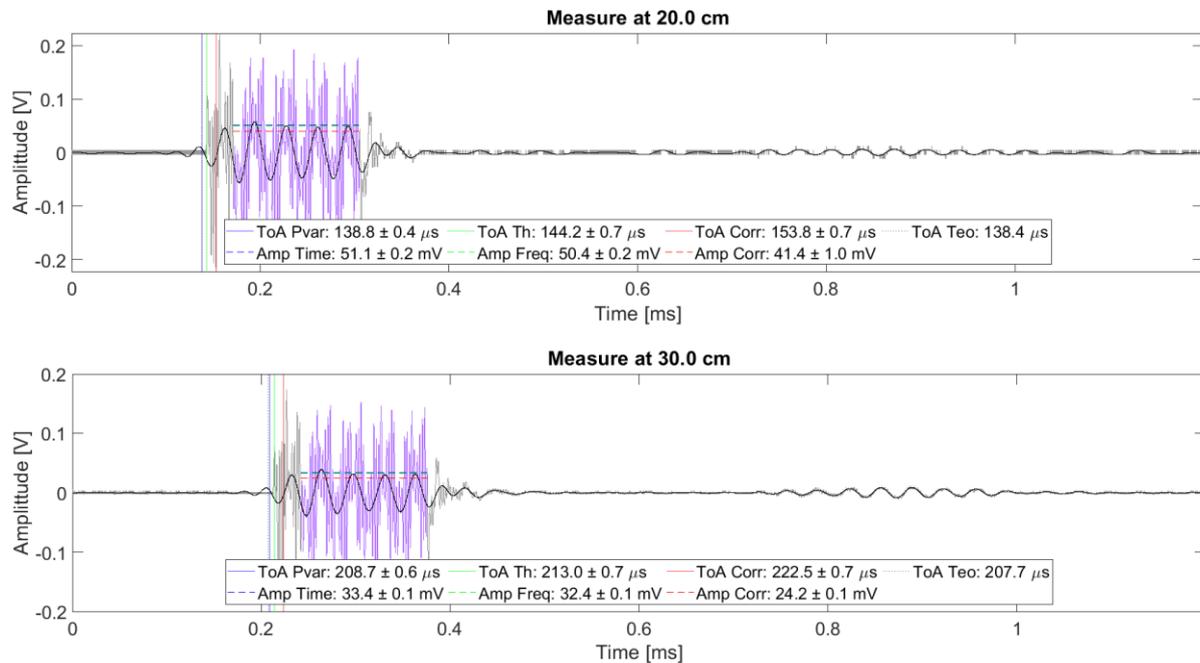


Figura 15. Ejemplo experimental de la estimación de amplitud y del tiempo de llegada ToA

En la gráfica anterior vemos los resultados de aplicar las tres formas planteadas de análisis de señal. Identificando los ToA podemos recortar el primer ciclo, trabajar con una zona estable (zona morada) y filtrar en tiempo y frecuencia para estimar amplitud de los ToA calculados podemos decir que la diferencia máxima entre los ToA teóricos y los calculados no es superior a $16 \mu\text{s}$, y este valor también incluye el retardo de emisión. Por otro lado, la desviación estándar entre los valores de amplitud es de aproximadamente 1 dB.

Todos los conceptos anteriormente mencionados han sido incluidos en un “script” de Matlab desarrollado y con el que analizaremos los datos obtenidos en los procesos de medida, igualmente automatizados. Se detalla en el siguiente apartado de desarrollo experimental de este trabajo.

III. DESAROLLO EXPERIMENTAL

ACOUSTIC BEACON

Las Balizas Acústicas (AB) utilizadas en el sistema de posicionamiento de KM3NeT han sido diseñadas y desarrolladas por la Universidad Politècnica de València en asociación con la empresa Mediterráneo Señales Marítimas S.L. Están diseñadas para trabajar en entornos submarinos soportando presiones de hasta 440 bares, con un rango de emisión de banda ancha (de 20 kHz a 60 kHz) [2].

Los AB se componen básicamente de un transductor piezo-cerámico cilíndrico resonante a 30 kHz de la marca Sontech con referencia FFR SX30 con especificaciones según fabricante un diámetro de cilindro interior de 1.88 cm y exterior de 4.47 cm [16] (ver figura 16).

Considerando que el transductor radia como un pistón plano y utilizando la ecuación de campo lejano propuesta por Kinsler [11] tenemos:

$$L_R = \frac{\pi a^2 f}{c} = \frac{\pi \cdot 0.0223^2 \cdot 30000}{1469.2} = 3.19 \text{ cm} \quad (25)$$

Donde L_R corresponde al punto donde empieza el campo lejano, a es el radio del pistón plano, f es la frecuencia emitida y c es la velocidad de propagación en el medio.

El otro componente del AB es una placa electrónica que junto al transductor están integrados dentro de un cuerpo cilíndrico de aluminio anodizado o titanio de dimensiones 56.6 cm de longitud, un diámetro de 10 cm y un peso aproximado de 10 kg. (ver figura 17).



Figura 16. Transductor piezo-cerámico moldeado y listo para unir

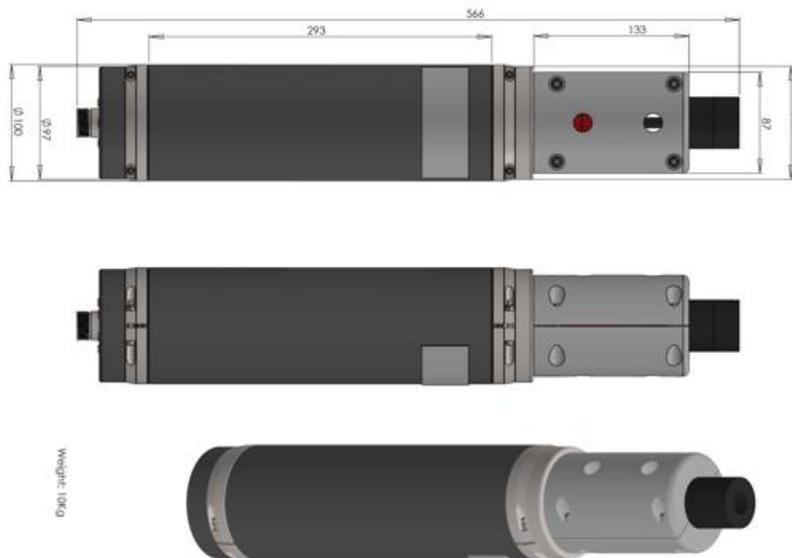


Figura 17. Dimensiones Acoustic Beacon. MSN

MEDIDAS EXPERIMENTALES

La campaña de medidas fue realizada en dos entornos adscritos al Instituto de Investigación para la Gestión de las Zonas Costeras (IGIC):

- Laboratorio de física aplicada de la UPV en el campus de Gandía que cuenta con un tanque de cristal templado de dimensiones 0.98 m x 1.14 m x 0.55 m (w x l x h) con un volumen de agua de $\sim 0.62 \text{ m}^3$. Para el movimiento del hidrófono receptor se utilizó un sistema de ejes motorizados programable a través de Matlab (ver figura 18).

En el tanque, el AB se encuentra a 17 cm del fondo y las posiciones del hidrófono receptor en todas las medidas siempre son mayores a la distancia de Rayleigh (calculada anteriormente) para garantizar que se trabaja en campo lejano.



Figura 18. Tanque y ejes motorizados en el Laboratorio.

- Tinglados 4 y 5 del Puerto de Gandía que cuenta con una piscina de dimensiones 5 m x 10 m x 1.5 m (w x l x h) y un volumen de agua de $\sim 55 \text{ m}^3$, para el movimiento del hidrófono receptor igualmente se cuenta con un sistema de ejes motorizados que proporcionan un volumen de cobertura de 34 m^3 con dimensiones de 3.6 m x 6.3 x 1.5 m (w x l x h) (ver figura19).

La ubicación del AB en la piscina es de 0,51 m del fondo e igualmente las posiciones en las medidas del hidrófono receptor siempre están situadas en campo lejano.



Figura 19. Piscina en Tinglado Puerto de Gandía.

La idea principal de realizar mediciones en los dos entornos (tanque y piscina) es determinar la influencia de las dimensiones del entorno de prueba y ver el efecto de las reflexiones, comparar y evaluar las campañas en términos como logística, tiempo de montaje y ejecución, accesibilidad, etc.

Instrumentación

Seguidamente se van a presentar los equipos utilizados para la emisión y adquisición de datos:

- Sistema PXI de National Instruments, modelo de chasis NI PXI103DC con un módulo de emisión NI PXI-5412 a 8 bits de resolución y módulo de adquisición NI PXI-5102 doble canal (ver figura 20).



Figura 20. Sistema de emisión - recepción NI

- Hidrófono esférico de banda ancha TC-4034 omnidireccional (ver figura 21). Presenta una respuesta (RVR) plana entre los 5 kHz y los 400 kHz [17].



Figura 21. Hidrófono TC-4034

- Fuente de alimentación Thurlby Thandar Instruments PL320 (ver figura 22).



Figura 22. Fuente de alimentación TTI PL-320

El sistema de emisión-recepción es controlado mediante el sistema de adquisición LabVIEW y el sistema de movimiento de motores y análisis de señales grabadas con Matlab (ver figura 23).

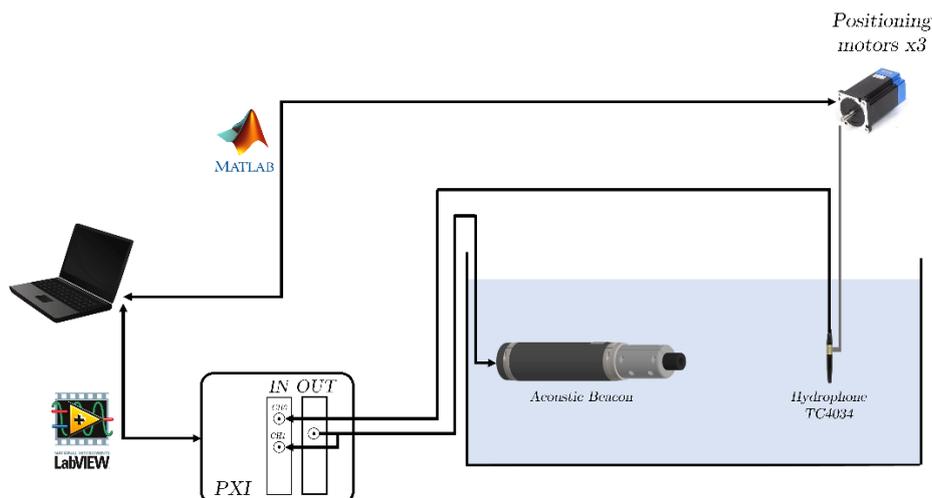


Figura 23. Esquema sistema activo emisor-receptor.

Montaje en tanque: Laboratorio

En la siguiente figura se muestra el montaje llevado a cabo en el laboratorio (ver figura 24)



Figura 24. Montaje para las medidas en tanque.

Montaje en piscina: Tinglado Portuario

En la siguiente figura se muestra el montaje llevado a cabo en tinglado (ver figura 25)

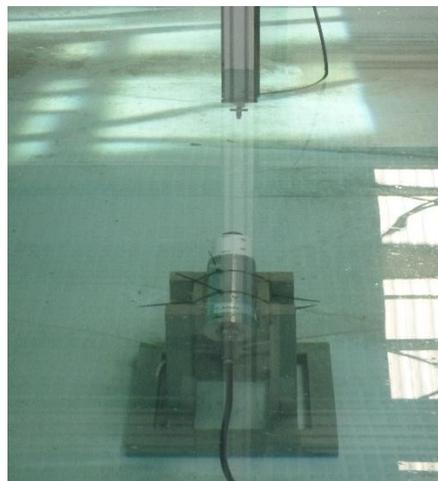


Figura 25. Montaje para las medidas en el tinglado portuario.

SISTEMA ACTIVO EMISOR-RECEPTOR PARA LA CARACTERIZACIÓN

En los dos entornos de medida, la instrumentación y configuración de los equipos fue la misma, para emitir se utilizaron señales sinusoidales ideales con frecuencias comprendidas entre los 20 a 60 kHz (rango de trabajo de los ABs) en pasos de 2 kHz y tipo “sine sweep” de 20 a 60 kHz y de 34 a 36 kHz. Los voltajes de carga del condensador del AB se varían desde los 20 hasta los 49 V en pasos de 10 V (rango de trabajo de los ABs, los que nos permitirá comprobar la respuesta lineal del AB).

Características a Calibrar

Nivel de presión sonora (SPL)

El nivel de presión sonora generado por el transductor es la proporción de presión P medida en la posición del receptor y expresada en dB. [11]

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (25)$$

Es común presentarla referenciada a la distancia de 1m de la fuente. En agua la presión de referencia utilizada es $1\mu Pa$:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{1m}}{1\mu Pa} \right) \quad (26)$$

Del hidrófono obtenemos señales eléctricas de voltaje (V_{rec}), sin embargo, nos interesa tener valores de presión (P_{rec}). Para la conversión utilizamos el parámetro RVR que corresponde a la sensibilidad del hidrófono (valor proporcionado por el fabricante):

$$P_{rec} = \left(\frac{V_{rec} \cdot P_{ref}}{10^{\frac{RVR}{20}}} \right) \quad (27)$$

En nuestro caso según el fabricante el valor del RVR del Hidrófono TC-4034 es de (-218 ± 4) dB (re a $1\mu Pa/V$) [17].

Para medir el SPL se emitieron las señales anteriormente descritas y detalladas en las hojas de campo (*service_record*) (ver anexo I) en las que se registra tanto la frecuencia como los voltajes de carga en el condensador del AB en cada emisión, el receptor (hidrófono) se ubicó en el eje motorizado a un ángulo de cero grados con respecto al AB y a una distancia de 20 cm en el caso del tanque y 1 m en piscina, con los datos de las señales recibidas se alimentan los scripts que aplican los conceptos y métodos anteriormente descritos dando como resultado los valores de SPL detallados en el punto IV del presente trabajo.

Directividad (DIR)

Presentado en diagramas polares describe el patrón de radiación del transductor, es decir el nivel de presión emitida en diferentes direcciones.

La respuesta de directividad del AB se obtuvo instalando el hidrófono (recepción) en el eje motorizado que varía la posición en una trayectoria circular de radio definido en pasos de 5° (desde -115° hasta 115°), las señales recibidas en cada punto son grabadas. Para obtener este parámetro se emiten 5 ciclos

de señales sinusoidales a las frecuencias: 20, 30, 40 y 50 kHz y una señal de barrido lineal “sine sweep” desde 30 a 32 kHz en 250 μ s (ver gráficas 26 y 27).

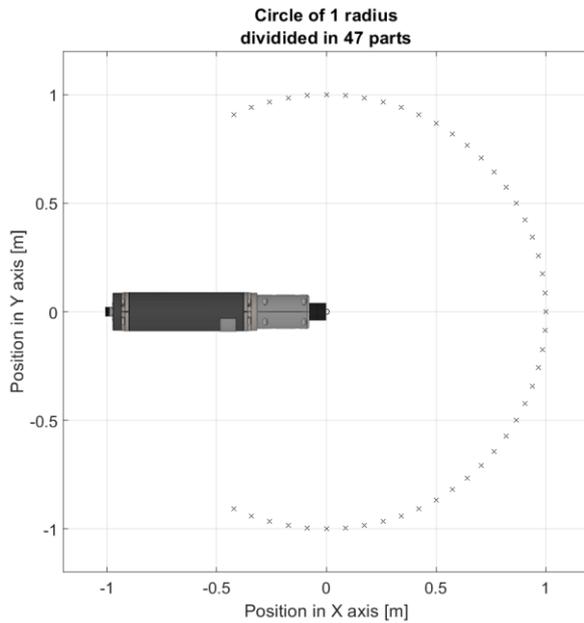


Figura 26. Vista superior de medida de directividad en piscina

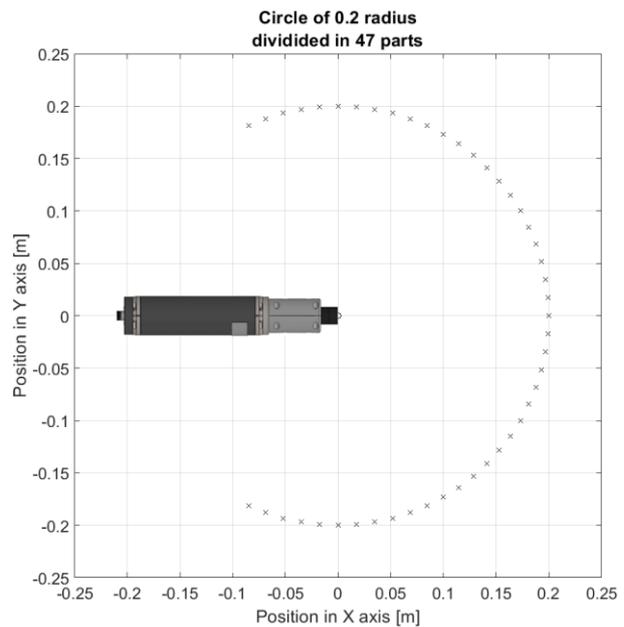


Figura 27. Vista superior de medida de directividad en tanque.

Tiempo de Respuesta

Es el tiempo transcurrido desde que ordenamos emitir al transductor hasta que la señal es enviada. Este parámetro es interesante tenerlo caracterizado dada la complejidad electro-mecánico-acústica de un AB y debe ser tenido en cuenta para mejorar la precisión del sistema acústico de posicionamiento en KM3NeT. Este valor se calcula midiendo a diferentes distancias emisor-receptor y considerando los diferentes tiempos de llegada, se obtuvo con el AB en posición fija y variando la posición del receptor en una trayectoria lineal a 0° con respecto al AB empezando a 5 cm de la fuente y separándose en pasos de 5 cm hasta un máximo de 1 m en el caso de piscina, y a partir de los 2.5 cm de la fuente en pasos de 2.5 cm hasta la máxima separación de 25 cm cuando se trabajó en el tanque (ver figuras 28 y 29). Será en el análisis posterior en donde estimaremos el valor de tiempo de respuesta. Esto es gracias a tener sincronizados la emisión-recepción, que graba nada más se envía la señal de trigger al AB, lo que significa que el ToA equivale al valor del ToF. Si existe algún retardo en el sistema, el desplazamiento del punto de corte de la recta de ajuste con el eje X lo indicará (ver figuras 32 y 33).

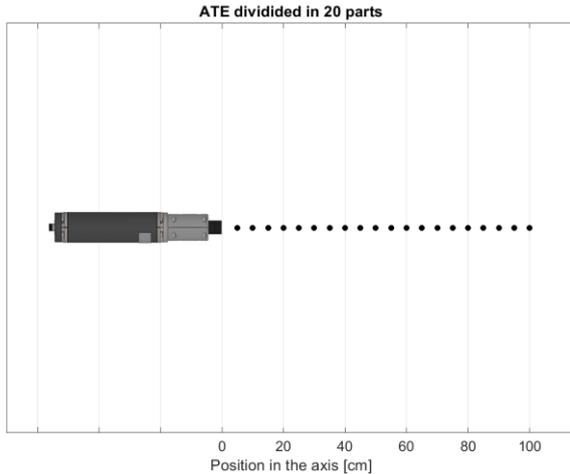


Figura 28 Vista superior medida de atenuación en piscina.

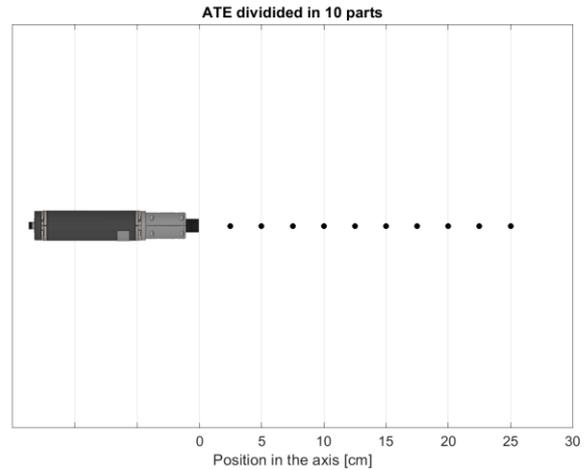


Figura 29. Vista superior medida de atenuación en tanque.

Los comandos utilizados para operar la tarjeta electrónica de los AB se detallan en el manual de software de las cuales destacamos las siguientes:

- **scv** (Set Capacitor Voltage), comando mediante el cual se define el valor de voltaje de carga del condensador.
- **sweep f1 f2 A T**, comando mediante el cual se genera una señal sweep desde las frecuencias f1 a f2 con un periodo de duración T y amplitud A.
- **sine f A T**, comando mediante el cual se genera un tono de frecuencia f con un periodo de duración T y amplitud A.
- **ent** (Enable Trigger), comando mediante el cual se activa el modo trigger para el disparo de la señal previamente cargada.

Una vez caracterizado y previo a su instalación in situ todos los AB son sometidos a una prueba de resistencia a la presión en cámara hiperbárica que somete las balizas a presiones de hasta 310 bares. Como ejemplo se presenta el resultado de la prueba realizada al AB identificado con el número 46 referencia 18244-2 (ver anexo II).

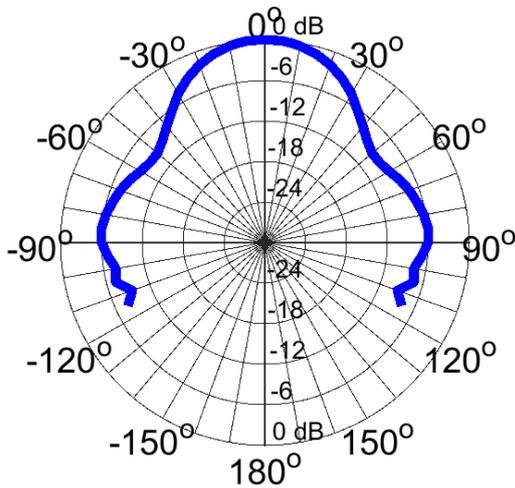
IV. RESULTADOS

En este apartado se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos en los dos entornos de trabajo (piscina y tanque), siguiendo la metodología anteriormente expuesta y trabajando con el emisor Acoustic Beacon identificado con el número de serie 046, se comparan los valores obtenidos resaltando las diferencias entre ellos para posteriormente presentar conclusiones.

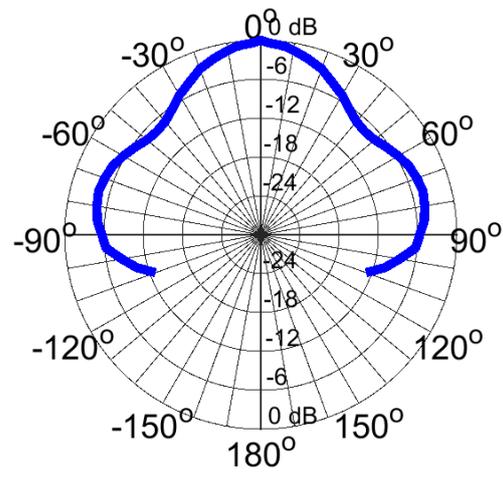
DIRECTIVIDAD (DIR)

Las siguientes gráficas muestran los diagramas polares correspondientes a las medidas de directividad (ver figuras 30 y 31) como es esperable en ambos entornos se aprecia una mayor directividad a frecuencias más altas, sin embargo, aun tratándose del mismo transductor y configuración vemos unos diagramas más estrechos en piscina en relación a las medidas del tanque, esto puede ser causado porque las mayores dimensiones de esta producen una menor contribución de las reflexiones en los contornos, lo que en el tanque se agudizaría provocando un aumento de señal recibida en los laterales.

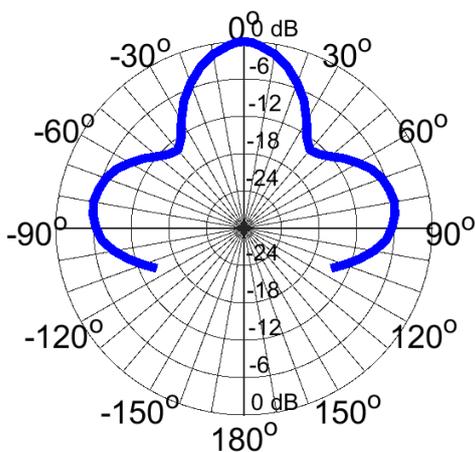
Piscina



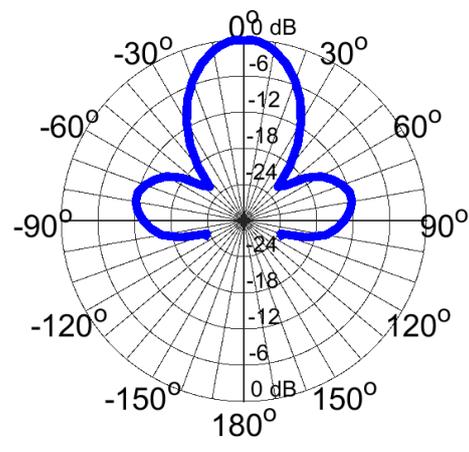
20 kHz



30 kHz



40 kHz



50 kHz

Figura 30. Directividad registrada en piscina.

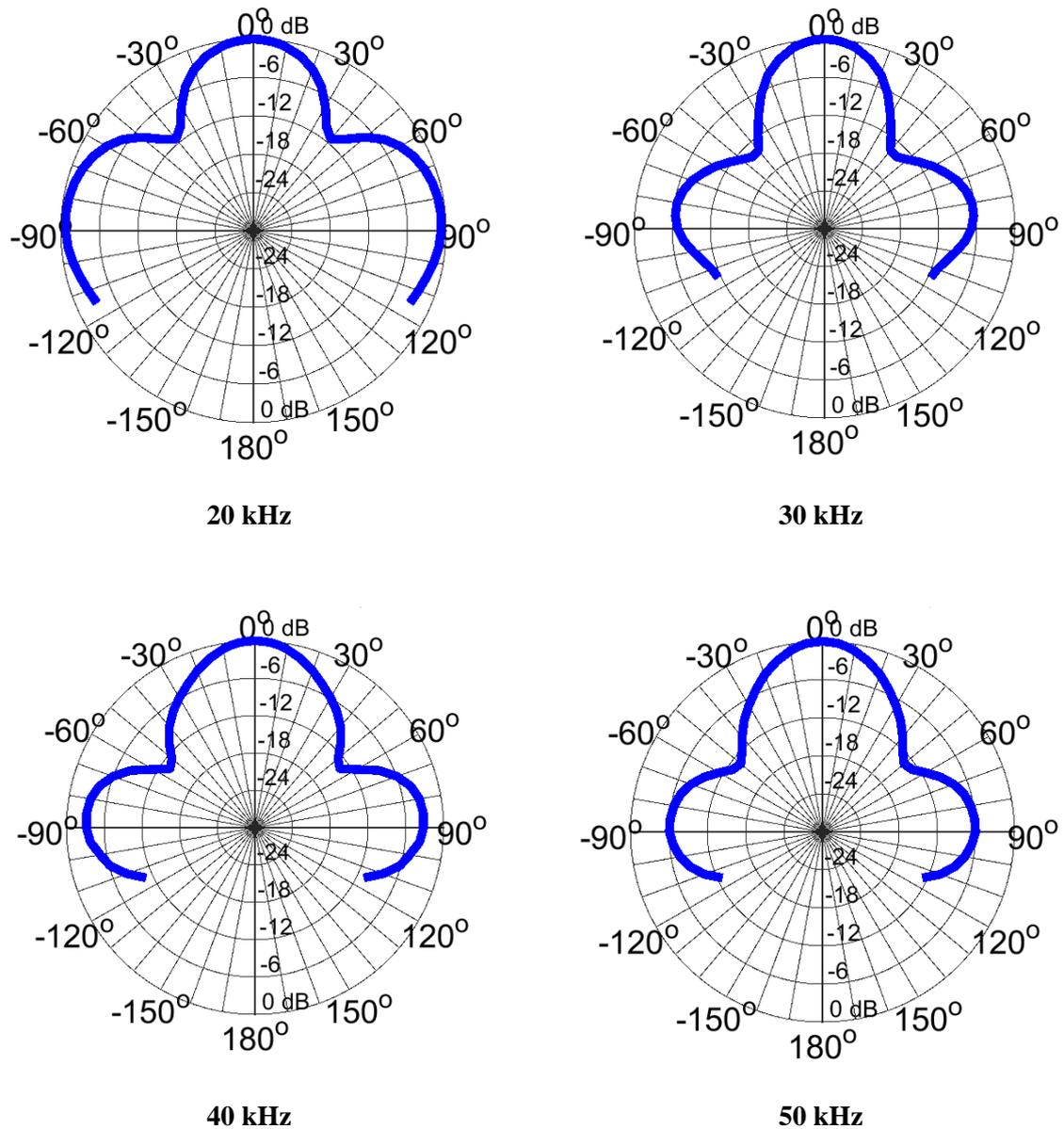
Tanque

Figura 31 Directividad registrada en el Tanque.

TIEMPO DE RESPUESTA (DELAY)

Para la estimación de este parámetro se utilizan dos señales, un seno de 30 kHz y una señal “sine sweep” de 30 a 32 kHz de 250 μ s, a las que una vez grabadas a diferentes distancias sobre el mismo eje aplicamos los tres análisis de ToA (equivalente al ToF en nuestro sistema). Con los valores ToA (eje x) obtenidos y la distancia emisor – receptor (eje y) trazamos una gráfica a la que se realiza un ajuste lineal (ver ecuación 28).

$$dist_{ER} = c_{sound} \cdot ToA + offset \quad (28)$$

Utilizando el valor *offset* estimamos el tiempo de respuesta del AB: $Delay = -offset/c_{sound}$.

Las siguientes gráficas corresponden a las medidas de retardos obtenidos con la metodología seguida en el cálculo de ToA con *Threshold* en una señal tipo seno de 30 kHz (ver figuras 32 y 33).

Piscina

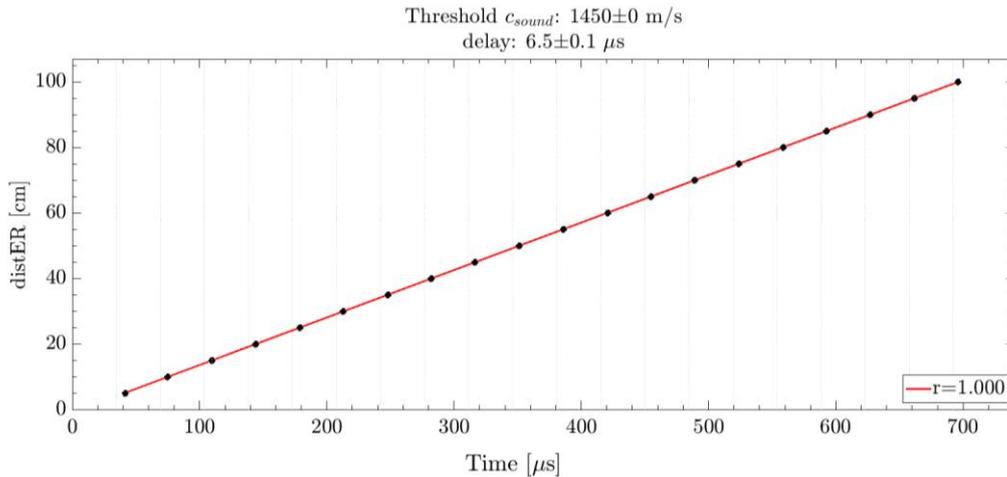


Figura 32 Retardo registrado en las medidas de la Piscina.

Tanque

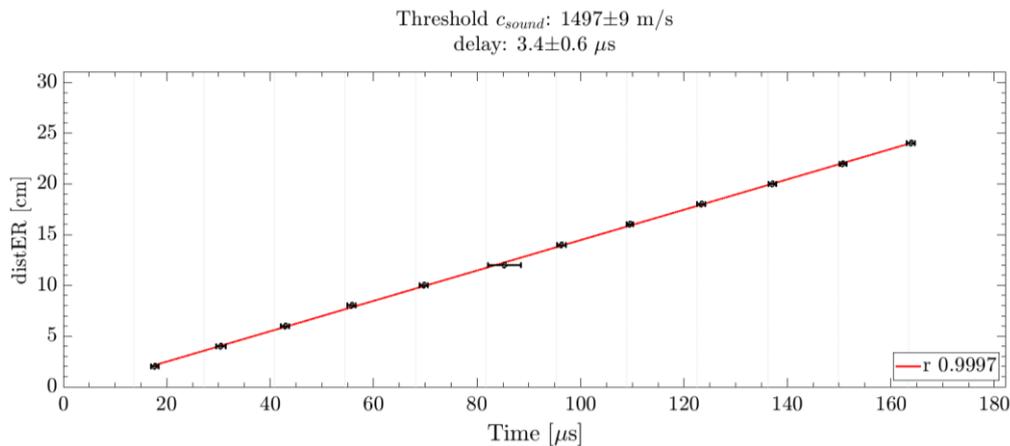


Figura 33 Retardo registrado en las medidas de la Tanque.

En el apartado Fundamentos de Acústica Submarina vimos como la velocidad de propagación en el agua dependía entre otros factores de la temperatura (ver tabla 1), por tanto, esperábamos una velocidad superior en el tanque que en piscina al presentar este una mayor temperatura del agua, para este apartado (47 ± 9 m/s) superior. Se puede observar igualmente que la diferencia entre retardos (tanque y piscina) es pequeña (~ 3.1 μ s).

NIVEL DE PRESIÓN SONORA (SPL)

Las siguientes gráficas muestran los niveles de SPL por frecuencia y a diferentes voltajes de carga de condensador del AB en cada entorno (ver figura 34 y 35) se observan diferencias de nivel resultados comentados en el apartado conclusiones del presente trabajo.

Piscina

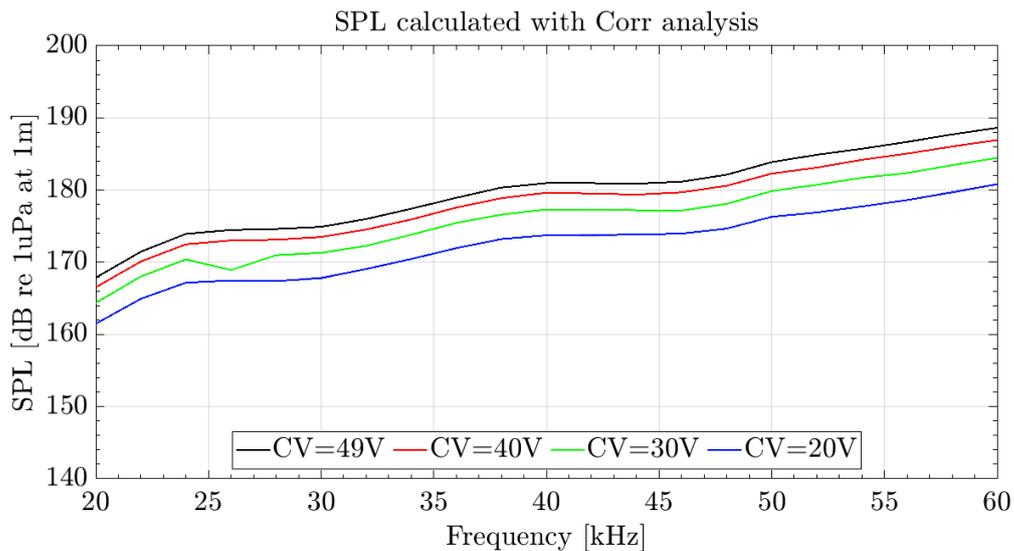


Figura 34. Niveles SPL registrados en la Piscina.

En la gráfica anterior se observa que el valor mínimo de SPL registrado en piscina es de 162 dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m), que corresponde a un voltaje de carga de condensador de 20 V y una frecuencia de 20 kHz, el valor máximo es de 188 dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m) con un voltaje de carga de condensador de 49 V (máximo permitido) y a una frecuencia de 60 kHz.

Tanque

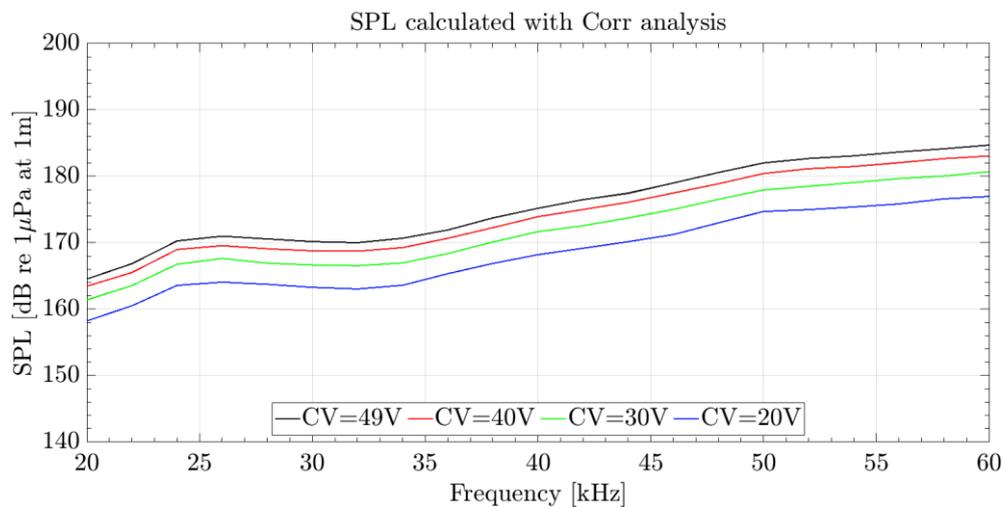


Figura 35. Niveles SPL registrados en el Tanque

En la gráfica anterior se observa que el valor mínimo de SPL registrado en tanque es de 158 dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m), que corresponde a un voltaje de carga de condensador de 20 V y una frecuencia de 20 kHz, el valor máximo es de 185 dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m) con un voltaje de carga de condensador de 49 V (máximo permitido) y a una frecuencia de 60 kHz.

La diferencia entre el valor máximo y mínimo registrados (dos entornos de trabajo) para una misma carga es aproximadamente ~ 4 dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m) de tal manera que si se considera un único valor para máxima carga de condensador (49 V) en el rango de frecuencias de 20 a 60 kHz es de (185 ± 4) dB (*re a* $1\mu Pa$ a 1m).

CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS SPL

A continuación, se presenta una gráfica que resume los resultados SPL obtenidos (ver figura 36) y una tabla que muestra indicadores estadísticos como la media y desviación estándar aplicados a las diferencias de niveles registrados en los dos entornos de trabajo ($SPL_{pool} - SPL_{tank}$) (ver figura 36).

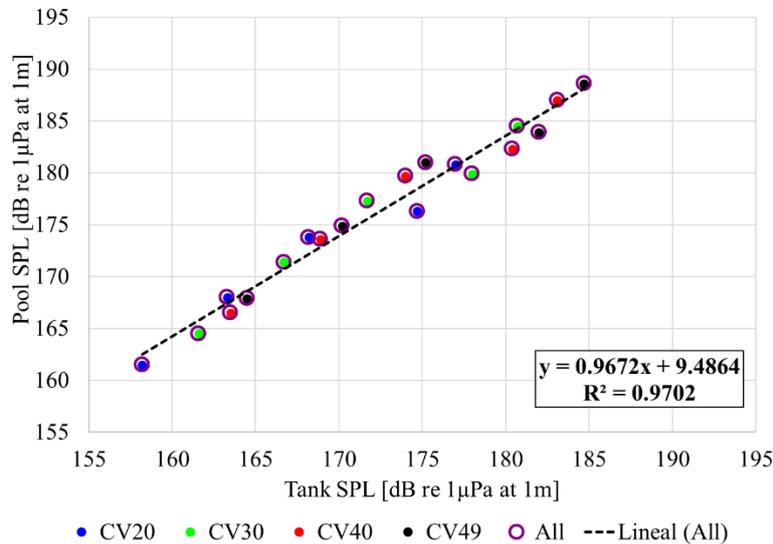


Figura 36. Comparación de los niveles SPL registrados en Tanque y Piscina.

La siguiente tabla vemos que cuando variamos el voltaje de carga del condensador los valores obtenidos en tanque y piscina presentan una diferencia que se mantiene en $(\sim 3.8 \pm 1.4)$ dB independiente del valor de voltaje, esto es debido a la respuesta lineal del AB. Por otra parte, en frecuencia la respuesta no es lineal ya que la interacción de la señal con el medio y los contornos cambia dependiendo de la frecuencia. De igual manera un posible desalineamiento a 0° durante el montaje en los dos entornos puede variar los resultados y por ende aumentar la diferencia entre los mismos (ver tabla 4).

freq [kHz]	CV20	CV30	CV40	CV49	mean	std
20	3.30	2.90	3.00	3.40	3.15	0.24
30	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	0.00
40	5.60	5.60	5.70	5.80	5.68	0.10
50	1.60	1.90	1.90	1.90	1.83	0.15
60	3.80	3.80	3.90	3.90	3.85	0.06
mean	3.80	3.78	3.84	3.94		
std	1.51	1.45	1.47	1.46		

Tabla 4. Tabla comparativa de los valores SPL entre tanque y piscina ($SPL_{piscina} - SPL_{tanque}$).

Los resultados finales son mostrados en una ficha de calibración que es entregada al cliente final con cada AB (ver anexo III)

V. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado la metodología, entorno e instrumentación utilizada en la caracterización de las balizas acústicas diseñadas y fabricadas para el trabajo dentro del entorno del telescopio KM3NeT, así como los resultados experimentales del proceso realizado a la baliza identificada con el número 046.

Igualmente dimos un repaso a los principales fundamentos físicos que intervienen en el fenómeno de propagación de ondas de sonido en agua, usadas en el post análisis de las medidas experimentales.

Aunque los resultados incluidos en este trabajo corresponden al AB046 tuvimos la oportunidad de compararlos con otros ABs lo que nos confirma que, aunque son fabricados utilizando iguales componentes y metodología, la respuesta del producto final presenta pequeñas diferencias entre unos y otros, por lo que es importante someter cada AB a un proceso de calibración y entregar al usuario final una ficha resumen de las características y resultados individuales.

Aunque la metodología y aplicaciones fueron diseñadas con señales teóricas (ideales), la comparación con el resultado de la aplicación a señales experimentales da validez a estas técnicas. Igualmente hemos comparado los resultados en dos entornos diferentes y se aprecia una mejora en el entorno con menos reflexiones (piscina).

Los diagramas polares resultado de medir en tanque resultan menos directivos comparados con los de piscina lo que pone en evidencia de las contribuciones de las reflexiones producidas en los contornos, es decir un contorno de prueba con menores dimensiones produce reflexiones de mayor contribución en la señal recibida que son difíciles de eliminar en el análisis.

Los niveles de SPL registrados en los AB están entre los 158 y 188 dB (*re* $1\mu Pa$ a 1m), y por la documentación consultada entendemos que las exigencias de la colaboración son suficiente para los propósitos del detector KM3NeT.

Las diferencias en los valores de SPL entre las medidas en la piscina y tanque, según el voltaje de carga del condensador del AB, confirman una respuesta lineal en potencia de este, sin embargo, la respuesta en frecuencia es variable.

En el entorno de piscina registramos niveles de SPL mayores que en el tanque, será debido a que en el tanque las reflexiones son de tipo destructivo por tener más próxima la frontera posterior al hidrófono. A demás a distancias cortas entre emisor y receptor un desalineamiento a 0° conlleva una mayor desviación angular.

Aunque en piscina el retardo es casi el doble que el registrado en tanque, debemos tener en cuenta que una diferencia de $3\mu s$ con una velocidad de $1495\left[\frac{m}{s}\right]$ corresponde a una distancia menor de 50 mm, lo que supone una diferencia asumible en distancia. Esto no supondría mayor variabilidad para el APS de KM3NeT: el retardo (tiempo) es la principal característica a tener en cuenta, pues el tiempo de vuelo es el parámetro utilizado para calcular distancias y poder determinar la posición.

El espacio del tinglado al pertenecer al IGIC es un espacio compartido con otros grupos de investigación lo que implica que nuestro montaje para realizar medidas de ABs no puede ser fijo, cada vez que se realiza una campaña de medidas implica además del traslado de los respectivos equipos y personal hasta el lugar un tiempo de mayor dedicación en montaje y desmontaje. La agenda del espacio depende igualmente de la disponibilidad y un protocolo de solicitud que incrementa el tiempo de duración de

todo el proceso de caracterización. Por tanto, las medidas en laboratorio ofrecen mayor facilidad e inmediatez para responder una solicitud de caracterización.

El laboratorio resulta más ergonómico en el momento de realizar el montaje para las campañas de medidas y solventar imprevistos que se presenten durante las mismas, por ejemplo, es más fácil acceder a los transductores dada las dimensiones y el volumen de agua usados.

En el análisis se evidencia que el tanque al tener unas dimensiones menores que la piscina resulta un entorno más reverberante, el número de reflexiones es mayor y de mayor amplitud lo que exige un mayor cuidado en el filtrado de la señal de interés, contrario a los resultados de medidas en piscina en donde las señales no deseadas son identificadas con mayor facilidad.

La calibración del equipo es una parte fundamental del proceso de producción y puesta en marcha de equipos que aseguren fiabilidad, en nuestro caso es una calibración en laboratorio, pero una vez instalados es aconsejable calibrar “in situ” teniendo en cuenta las condiciones del entorno de trabajo del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MOREIRA, M. A. (2009). EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS. *REVISTA BRASILEÑA DE ENSEÑANZA DE FÍSICA*, 31(1), 1-16.
- [2] SALDAÑA COSCOLLAR, MARÍA. *ACOUSTIC SYSTEM DEVELOPMENT FOR NEUTRINO UNDERWATER DETECTORS*. 2017. TESIS DOCTORAL. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- [3] AIELLO, S., ALBERT, A., GARRE, S. A., ALY, Z., AMELI, F., ANASSONTZIS, E. G., ... & LONGHITANO, F. (2020). DEEP-SEA DEPLOYMENT OF THE KM3NET NEUTRINO TELESCOPE DETECTION UNITS BY SELF-UNROLLING. *JOURNAL OF INSTRUMENTATION*, 15(11), P11027.
- [4] LLORENS ALVAREZ, C. D. (2017). *DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ELECTRÓNICA DE LOS EMISORES ACÚSTICOS PARA LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN DE TELESCOPIOS SUBMARINOS DE NEUTRINOS* (DOCTORAL DISSERTATION, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA).
- [5] SEÑALES MARITIMAS Y AYUDAS A LA NAVEGACIÓN. (20 DE MAYO DE 2022). [HTTPS://MESEMAR.COM/](https://MESEMAR.COM/)
- [6] MEDWIN, H. (1975). Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(6), 1318-1319.
- [7] MACKENZIE, K. V. (1981). Nine-term equation for sound speed in the oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), 807-812.
- [8] FRANCOIS, R. E., & GARRISON, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890.
- [9] SIMMONDS, J., & MACLENNAN, D. N. (2008). *Fisheries acoustics: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- [10] LURTON, XAVIER (2002). "Underwater acoustic wave propagation" en X. Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics, Principles and Applications*. UK:Praxis Publ.
- [11] KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., & SANDERS, J. V. (2000). *FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS*. JOHN WILEY & SONS.
- [12] RAMIS, J., ALBA, J., & MARTÍNEZ, J. Y. U. A. (1998). CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TRANSDUCTORES. *VALENCIA, ESPAÑA.: UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE VALENCIA*.
- [13] RAVINDRA, S., & JAGADEESHA, S. N. (2014). Time of arrival based localization in wireless sensor networks: A linear approach. *arXiv preprint arXiv:1403.6697*.
- [14] PROAKIS, J. G., & MANOLAKIS, D. G. (1996). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River New Jersey.
- [15] ADRIÁN-MARTÍNEZ, S., BOU-CABO, M., FELIS, I., LLORENS, C. D., MARTÍNEZ-MORA, J. A., SALDAÑA, M., & ARDID, M. (2014, JUNE). Acoustic signal detection through the cross-correlation method in experiments with different signal to noise ratio and reverberation

conditions. In International conference on Ad-Hoc Networks and wireless (pp. 66-79). Springer, Berlin, Heidelberg.

[16] SENSORTECH CANADA (24 DE MAYO DE 2022) [HTTPS://SENSORTECHCANADA.COM/2021/07/14/SX30/](https://sensortechcanada.com/2021/07/14/sx30/)

[17] TELEDYNEMARINE (26 DE MAYO DE 2022) [HTTP://WWW.TELEDYNEMARINE.COM/RESON-TC-4034?PRODUCTLINEID=48/](http://www.teledynemarine.com/reson-tc-4034?PRODUCTLINEID=48/)

ANEXO I

Ficha de campo tanque

SPL	F	T	V			
			20 V	30 V	40 V	49 V
Sin	f (kHz)	length (us)				
1	20	250				
2	22	228				
3	24	209				
4	26	193				
5	28	179				
6	30	167				
7	32	157				
8	34	148				
9	36	139				
10	38	132				
11	40	125				
12	42	120				
13	44	114				
14	46	109				
15	48	105				
16	50	100				
17	52	97				
18	54	93				
19	56	90				
20	58	87				
21	60	84				

Notes:

Date:

CH rec:

T rec:

FFR:

AB SN:

Temp:

Depth:

fs:

TANK

SPL	F1-F2	T	V
sweep	f (kHz)	length (us)	40 V
22	20-60	250	
23	34-36	250	

FORMAT SIGNALS:

'signal'_'distER'cm_'F'kHz_'T'us_'Fs'MHz

'signal'_'distER'cm_'F1'-'F2'kHz_'T'us_'Fs'MHz

DIR	F	T	V
Sin	f (kHz)	length (us)	40 V
1	20	250	
2	30	167	
3	40	125	
4	50	100	
5	34-36	250	

ATE	F	T	V
sweep	f (kHz)	length (us)	CV
1	20-60	250	40 V
2	34-36	250	40 V

ATE	distER [cm]	1	2
1	2.5		
2	5		
3	7.5		
4	10		
5	12.5		
6	15		
7	17.5		
8	20		
9	22.5		
10	25		

ATE	distER [cm]	1	2
11	27.5		
12	30		
13	32.5		
14	35		
15	37.5		
16	40		
17	42.5		
18	45		
19	47.5		
20	50		

ANEXO II

Resultado Test cámara hiperbárica AB46 (ref. 18244-2).



HIPERBARIC, S. A.		
C/ Condado de Treviño, 6 – 09001 BURGOS, ESPAÑA		
CIF – ES A-09016338	Tel. +34 947 47 38 74	Fax. +34 947 47 35 31
www.hiperbaric.com		

PRESSURE TEST ON KM3NeT ACOUSTIC SYSTEMS

On June 25, 2019, the Polytechnic University of Valencia (Universitat Politècnica de València, UPV) performed at Hiperbaric's facilities in Burgos (Spain) a pressure test on four KM3NeT Acoustic Beacons (ref. 18244-1, 18244-2, 18244-3, 18244-4). Each system was tested separately in a Hiperbaric 135 unit (Figure 1) at the following conditions:

Set pressure	310 bar \pm 10 bar
Pressure holding time	3600 s
Pressure rise speed	620 bar/min
Pressure release speed	From 310 bar to 100 bar: 100 bar/min From 100 bar to 1 bar: uncontrolled speed
Pressurization water temperature	20 °C

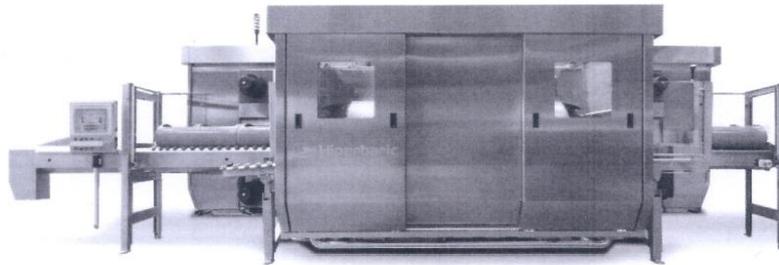


Figure 1. Hiperbaric 135 unit used for pressure tests

Hiperbaric confirms that the four acoustic devices brought by UPV were tested according to the above defined parameters.

Date: June 25, 2019

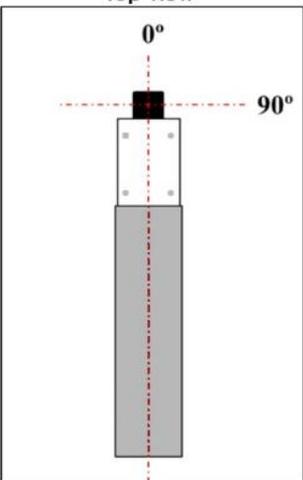
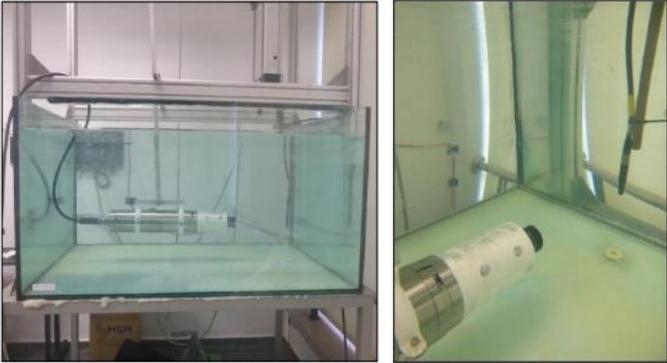
Test supervisor: Mario González
Department of Applications and Food Processing, Hiperbaric

Signature:



ANEXO III

La siguiente es la Ficha de Calibración AB46.

MAB 100 ACOUSTIC BEACON SN: 046	
p.1/2	
General Calibration setup	
MAB 100 ACOUSTIC BEACON: Transducer FFR SX30 + Electronic Beacon Board	
<ul style="list-style-type: none"> - Date: March 2021 - Place: tank at Gandia's Laboratory (UPV) - DAQ system: PCI-5102 (NI PXI-1031) - Studied signal: tones between 20 kHz and 60 kHz - Capacitor Voltage (Cv): between 20 V to 49 V 	
Reference hydrophone: RESON TC4034	
Images	
Top view 	0 deg. pos. -Tank- 
Electronic Delay	
Less than 5 μ s	
Electro-Mechanic-Acoustic Delay	
By pvar – threshold - correlation method: $6 \pm 3 \mu$s <small>(sweep 30 to 32 kHz of frequency. Cv: 40 V)</small>	



MAB 100 ACOUSTIC BEACON SN: 046

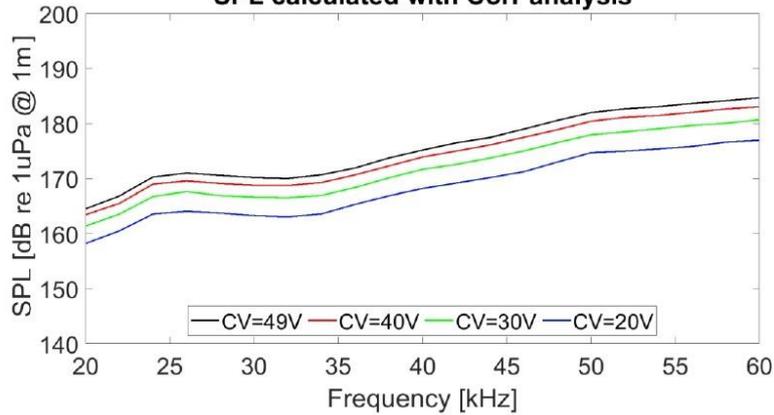
p.2/2

MAB 100 ACOUSTIC BEACON

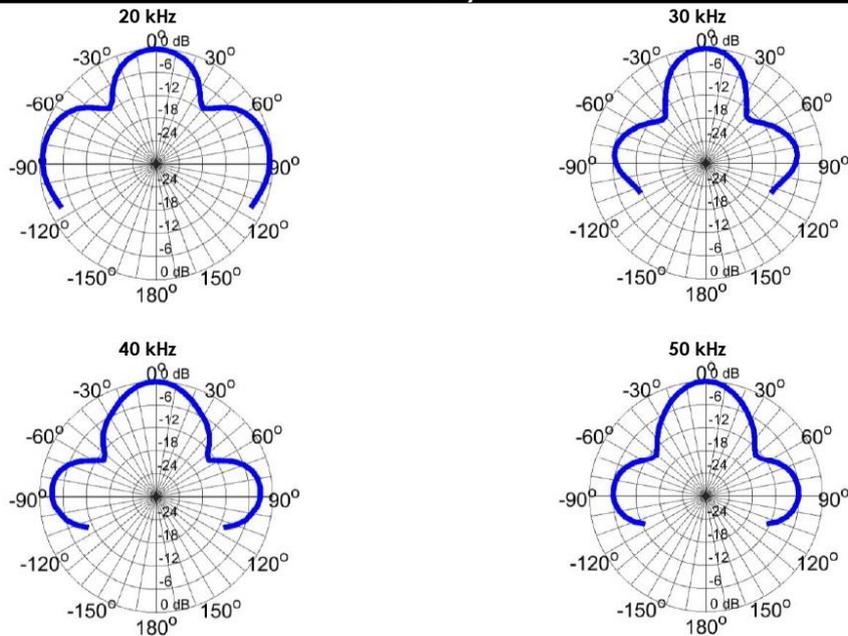
Sound Pressure Level

0 deg. pos.

SPL calculated with Corr analysis



Directivity



Cv: 40 V

