



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Estudio e implementación de un sistema de
posicionamiento submarino con dos hidrófonos.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Tecnología Digital y Multimedia

AUTOR/A: Martínez Chova, Elena

Tutor/a: Ferrer Contreras, Miguel

Cotutor/a externo: BUSQUETS MATAIX, JAVIER

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

En este trabajo Final de Grado se abordará el problema del posicionamiento de fuentes de señales acústicas submarinas, con aplicación al posicionamiento y seguimiento de cetáceos o a la ayuda a la navegación respecto de una baliza acústica submarina.

Se revisará la teoría de la acústica submarina, considerando aspectos como las fuentes de ruido submarino y sus efectos en el medio marino. También se describirán los transductores y dispositivos empleados en este campo y en particular, los hidrófonos usados en este trabajo.

Además, se propone realizar un montaje experimental para la emisión de señales de amplio espectro y su adquisición con dos hidrófonos para que sirva de base de un sistema de posicionamiento implementable en plataformas submarinas fijas o móviles.

Resum

En aquest treball Final de Grau s'abordarà el problema del posicionament de fonts de senyals acústics submarins, amb aplicació al posicionament i seguiment de cetacis o a l'ajuda a la navegació respecte d'una balisa acústica submarina.

Es revisará la teoria de l' acústica submarina, considerant aspectes com les fonts de soroll submarí i els seus efectes en el medi marí. També es descriuran els transductors i dispositius emprats en aquest camp i en particular, els hidròfons usats en aquest treball.

A més, es proposa realitzar un muntatge experimental per a l' emissió de senyals d' ampli espectre i la seva adquisició amb dos hidròfons perquè serveixi de base d' un sistema de posicionament implementable en plataformes submarines fixes o mòbils.

Abstract

This Final Degree Thesis will address the problem of the positioning of sources of underwater acoustic signals, with application to the positioning and tracking of cetaceans or to the aid to navigation in relation to an underwater acoustic beacon.

The theory of underwater acoustics will be reviewed, considering aspects such as the sources of underwater noise and their effects on the marine environment. The transducers and devices used in this field and, in particular, the hydrophones used in this work will also be described.

In addition, it is proposed to carry out an experimental assembly for the emission of broad spectrum signals and their acquisition with two hydrophones to serve as the basis for a positioning system that can be implemented on fixed or mobile underwater platforms.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi mentor Álvaro Lloret por todo el esfuerzo y tiempo dedicado en mí. Esta tesis no hubiera sido posible sin todos los conocimientos de acústica marina que me ha enseñado, gracias.

También me gustaría agradecer a mi tutor Miguel Ferrer, por adentrarme en el mundo del sonido con sus asignaturas y apoyarme con la idea de este proyecto desde el principio.

A Víctor Espinosa, por darme la oportunidad de formar parte de este grupo de investigación.

Finalmente, a mi familia, por hacer posible esta etapa y especialmente a mi hermano Carles, quien ha estado ahí cuando más lo necesitaba durante mi carrera universitaria.

Índice general

1	Introducción y Objetivos	11
1.1	Objetivos generales	11
1.2	Introducción	11
1.3	Historia de la acústica marina	12
2	Marco teórico	15
2.1	Principios de acústica	15
2.1.1	Ondas sonoras	15
2.1.2	Unidad de medida del sonido: el decibelio.	16
2.1.3	Velocidad de propagación	17
2.1.4	Impedancia acústica	17
2.1.5	Ondas esféricas	18
2.1.6	Propagación en el medio subacuático	18
2.1.7	Multi-trayecto	19
2.1.8	Teoría de rayos	20
2.1.8.1	Ley de Snell	20
2.1.9	Pérdidas de propagación	21
2.1.9.1	Absorción	21
2.1.9.2	Reflexión	22
2.1.9.3	Refracción	22
2.1.9.4	Dispersión geométrica	22
2.2	Ruido	22
2.2.1	Relación señal-ruido	23
2.2.2	Efecto Doppler	23
2.2.3	Tipos de ruido submarino	23
2.3	Hidrófonos	24
2.4	Sistemas de escucha pasiva y activa	25
2.4.1	Técnicas y aplicaciones de acústica pasiva	25
2.4.2	Técnicas y aplicaciones de acústica activa	25
2.4.2.1	Balizas acústicas	26
2.4.2.2	Sonares	26
2.4.3	Sistema de posicionamiento acústico submarino	26
2.4.3.1	Sistema de posicionamiento acústico de línea de base ultra corta (USBL)	27
2.4.3.2	Sistema de posicionamiento acústico de línea de base corta (SBL)	27
2.4.3.3	Sistema de posicionamiento acústico de línea de base larga (LBL)	28

2.4.4	Señales Chirp, MLS y TSP	28
2.4.4.1	Señales Chirp	29
2.4.4.2	Señales MLS	29
2.4.4.3	Señales TSP	29
2.4.5	Tiempo de vuelo (ToF)	30
2.4.6	Diferencia de intensidades	30
3	Metodología	33
3.1	Montaje experimental	33
3.1.1	Captación de la señal audible	33
3.1.2	Materiales usados	35
3.1.3	Circuito usado	37
3.1.3.1	Cálculo de la variable distancia	38
3.1.3.2	Tiempo de vuelo TOF (time of flight)	38
3.1.3.3	Cálculo de la variable ángulo	38
3.1.4	Calibración del sistema de adquisición de señales acústicas	40
4	Resultados y discusión	43
4.1	Resultados correlaciones	43
4.2	Resultados distancias	46
4.3	Resultados ángulos	49
4.4	Discusión de los resultados	52
5	Conclusiones	53
5.1	Conclusiones y líneas futuras	53
6	Anexos	55
6.1	Cálculo de los ángulos teóricos	55
6.2	Cálculo de la distancia teórica del hidrófono 2 al proyector.	56
	Bibliografía	59

Índice de figuras

1.1	Una campana colgada de un barco fue golpeada bajo el agua por con una palanca y al mismo tiempo pusieron en marcha un destello de luz. Un observador en un segundo barco utilizado un tubo de escucha para medir el tiempo transcurrido entre el destello de luz y el el sonido de la campana.	12
2.1	Onda sinusoidal y sus parámetros.	15
2.2	El periodo de una señal.	16
2.3	Frecuencia alta y baja.	16
2.4	Ondas esféricas.	18
2.5	Propagación en el medio subacuático, representación del multicamino.	18
2.6	Fenómeno que genera la Interferencia entre Símbolos.	19
2.7	Ejemplo de rayo refractado a través de varias capas contiguas.	20
2.8	Trayectoria Sonora.	21
2.9	Refracción y reflexión del sonido.	22
2.10	Sonidos acústicos que están silenciando el fondo marino.	24
2.11	Hidrófono a punto de ser fondeado.	24
2.12	Sonar con sistema de escucha pasivo y activo para detección marina.	25
2.13	Sonar usado para la localización de submarinos.	26
2.14	Sistema de posicionamiento USBL.	27
2.15	Sistema de posicionamiento SBL.	28
2.16	Sistema de posicionamiento LBL.	28
2.17	Espectros de las señales Chirp, MLS y TSP.	29
3.1	Tanque de agua con los 2 hidrófonos y el altavoz.	33
3.2	Posición A (verde), Posición B (morado), Posición C (negro).	34
3.3	Distintos ángulos usados.	34
3.4	Osciloscopio Rohde Schwarz RTM 3000.	35
3.5	Grabadora TASCAM.	35
3.6	Amplificador Bosch 240W.	35
3.7	Transductor Lubell VC2C.	36
3.8	Hidrófonos H2d.	36
3.9	Circuito usado para la medición de señales audibles.	37
3.10	Vista del cálculo de ángulo para la posición A.	39
3.11	Vista del cálculo de ángulo para la posición B.	39
3.12	Vista del cálculo de ángulo para la posición C.	40
3.13	Sensibilidad en función de distintas tensiones para la señal emisión.	41
3.14	Sensibilidad en función de distintas tensiones para la señal emisión.	41

4.1	Correlaciones Posición A	43
4.2	Correlaciones Posición B	44
4.3	Correlaciones Posición C	45
4.4	Distancias Posición A	46
4.5	Distancias Posición B	47
4.6	Distancias Posición C	48
4.7	Ángulos Posición A	49
4.8	Ángulos Posición B	50
4.9	Ángulos Posición C	51

Índice de tablas

2.1	Impedancias acústicas en distintos medios	18
2.2	Tipos de sistemas de posicionamiento.	27

Listado de siglas empleadas

LBL Long Base Line.

MLS Maximum Length Sequences.

MPCC Maximum Peak Cross Correlation.

SBL Short Base Line.

SNR Signal to Noise Ratio.

SONAR SOund NAVigation and Ranging.

TL Transmission Loss.

TOF Time Of Flight.

TSP Time-Stretched Pulse.

USBL Ultra-Short Base Line.

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Objetivos generales

Los objetivos generales de este trabajo fin de grado consisten en crear un sistema de posicionamiento implementable en plataformas fijas o móviles para la emisión de señales de amplio espectro con la adquisición de dos hidrófonos.

Para alcanzar este objetivo general, se han planteando diversos objetivos específicos. En primer lugar, una comparación de la eficiencia del sistema de posicionamiento cuando se emplean tres tipos de señales distintas (MLS, TSP y SWEEP). Junto al desarrollo de algoritmos que permitan determinar el tiempo de vuelo, la distancia y el ángulo. Finalmente, una calibración del sistema de emisión y captación.

Este trabajo contribuye al desarrollo sostenible ODS nº14 - Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos humanos.

1.2. Introducción

”La acústica subacuática estudia la propagación del sonido en agua y la interacción de ondas mecánicas con el agua y sus fronteras.” [1]

El estudio de la propagación del sonido en el agua es de gran importancia para los océanos y sus ecosistemas, además de tener implicaciones importantes en otras áreas como la oceanografía, la comunicación submarina, la exploración submarina, la seguridad marítima y la vida marina.

Su principal uso se ha centrado en recibir información de vehículos sumergidos o monitorizar sensores medioambientales. Actualmente, también se ha potenciado aún más con la creación de sistemas de posicionamiento subacuático. Este trabajo final de grado se centra en este último tipo de utilidad en la acústica subacuática.

El movimiento del sonido bajo del agua se llama ”propagación del sonido”, es muy distinta a la que ocurre en el aire. El agua es un medio de transmisión de sonido altamente eficaz debido a

su alta densidad y a la capacidad que tiene para transmitir vibraciones a largas distancias.

Sin embargo, la variedad de factores ambientales y fenómenos físicos complejos puede tener un gran impacto en la propagación y la atenuación del sonido en los océanos [2]. Estos factores pueden ser muy variados, desde la luz, hasta campos electromagnéticos, energía térmica, energía radiactiva... Sin embargo hay uno más extendido que los demás y por ende, más destructivo. La contaminación acústica, se trata de ruido que interfiere en la propagación subacuática y altera o atenúa la señal.

1.3. Historia de la acústica marina

La narración de la acústica marina tiene un trasfondo interesante y ha sufrido importantes cambios a través del tiempo. Desde los intentos de entender cómo se propaga el sonido por el agua hasta los avances tecnológicos más recientes, se ha producido un gran avance en esta disciplina.

Los antecedentes de la acústica marina datan de los experimentos de Leonardo da Vinci en el siglo XV.[1] Leonardo Da Vinci se interesó en cómo el sonido se propaga a través del agua y trató de utilizarlo para detectar objetos que se encuentren bajo el agua o para comunicarse mientras está sumergido.

Leonardo Da Vinci escribió:

”Si detienes tu nave y colocas un extremo de un tubo largo en el agua y el otro extremo en tu oído, escucharás barcos a grandes distancias de ti”[1]

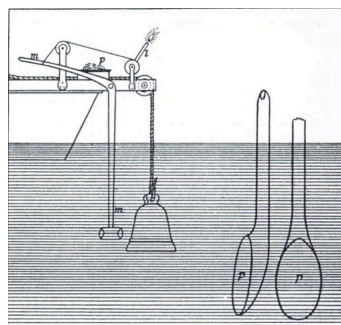


Figura 1.1: Una campana colgada de un barco fue golpeada bajo el agua por con una palanca y al mismo tiempo pusieron en marcha un destello de luz. Un observador en un segundo barco utilizado un tubo de escucha para medir el tiempo transcurrido entre el destello de luz y el sonido de la campana.

[2]

Sin embargo, fue a principios del siglo XX cuando se produjo un avance significativo en el área de la acústica marina a causa de la invención y desarrollo del sonar. El SONAR es un acrónimo que se entiende como "SOund NAvigation and Ranging" (navegación y marcaje por sonido).[2] Durante

la Primera Guerra Mundial, el sonar se volvió una herramienta indispensable para la detección de submarinos.

Con el transcurso del tiempo, se desarrollaron más sofisticados sistemas de sonar que permitían a los barcos medir con mayor precisión la distancia y profundidad del fondo marino, además, eran capaces de detectar objetos y vida marina. Estos avances ayudaron a realizar investigaciones oceanográficas más minuciosas y a cartografiar los fondos marinos de manera más minuciosa. En la década de 1950, se realizaron importantes investigaciones sobre acústica oceánica para comprender la propagación del sonido en el océano. Resulta que el sonido no viaja uniformemente, sino que varía con factores como la temperatura, la salinidad y la presencia de diferentes capas de agua con diferentes propiedades acústicas.

Con el tiempo, la acústica oceánica ha evolucionado en varias direcciones. Se han desarrollado técnicas avanzadas de modelado y simulación para predecir la propagación del sonido en el agua, lo cual es útil para las comunicaciones submarinas, la exploración de recursos oceánicos y la investigación de la vida marina. [3]

Además, la acústica oceánica ha contribuido al desarrollo de tecnologías como los sistemas de posicionamiento acústico, que permiten el posicionamiento de equipos submarinos, así como el estudio de las interacciones entre el ruido submarino y la vida marina para minimizar los impactos negativos en la ecología acuática.

En resumen, la historia de la acústica oceánica es una historia de descubrimiento y progreso tecnológico. Desde los experimentos iniciales hasta las tecnologías de hoy, esta disciplina ha transformado nuestra comprensión del medio ambiente acuático y ha generado aplicaciones importantes en varios campos de investigación y desarrollo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Principios de acústica

En el medio marino se encuentran desafíos a la hora de transmitir una señal acústica, ya que el océano se ve influenciado por varios factores como la salinidad, la presión, la temperatura, las corrientes marinas...capaces de deteriorar o deformar la señal e incluso afectar a la velocidad de transmisión. En este apartado se va a profundizar en el marco teórico acústico.

2.1.1. Ondas sonoras

Una onda sonora es una onda mecánica que consiste en una perturbación de partículas que se propagan por el medio subacuático, suficientemente perceptible para el oído humano o un hidrófono. [4]

La ecuación de onda es una función $y = f(x,t)$ que suele expresarse mediante una serie de magnitudes o parámetros característicos: [5]

Amplitud: La amplitud de una onda sonora es la máxima desviación que sufre una partícula en el medio que se propaga respecto a su posición sonora. [5]

Longitud de onda: La longitud de onda es la distancia que existe entre los dos puntos de la onda que se encuentran en el mismo estado de vibración.[5]

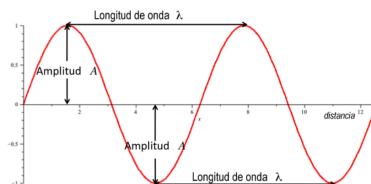


Figura 2.1: Onda sinusoidal y sus parámetros.

[5]

El periodo: El periodo es el tiempo que tarda la señal en oscilar por completo. [5]

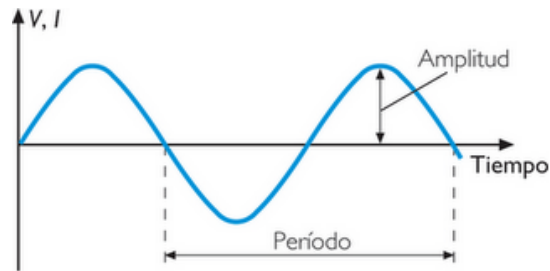


Figura 2.2: El periodo de una señal.
[5]

Frecuencia: La frecuencia es el número de oscilaciones por unidad de tiempo.[5]

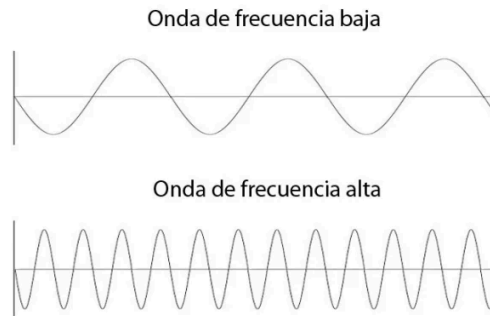


Figura 2.3: Frecuencia alta y baja.
[5]

2.1.2. Unidad de medida del sonido: el decibelio.

El decibelio recibió el nombre en honor a Alexandre Graham Bell. Esta unidad suele usarse en acústica y se abrevia con dB, es una unidad relativa, no absoluta. El nivel de intensidad del sonido en decibelios se define como en la fórmula 2.1 [6]

$$I(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) [dB] \quad (2.1)$$

La intensidad de referencia en el medio acuático es distinta a la del aire, esta es de 1 microPascal, ya que es la mínima perturbación que el oído humano puede percibir en el agua.

2.1.3. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación en el medio acuático es de 1.500 m/s aproximadamente en agua salada, mientras que en el aire la velocidad de propagación es de 340 m/s. La velocidad de propagación puede ser expresada a través de las características del medio en el que se propaga, como se observa en la fórmula 2.2. [4]

$$c = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.39 - 0.12T)(S - 35) + 0.017d[m/s] \quad (2.2)$$

Donde c es la velocidad del sonido en m/s, T es la temperatura del agua en grados centígrados, S la salinidad expresada en tanto por mil y d es la profundidad con relación a la superficie del mar en metros.

La velocidad de propagación puede variar mucho según la temperatura, presión y salinidad del mar.[4] Cuando la temperatura del agua aumenta en un grado centígrado, la velocidad de propagación en el agua lo hace en 2.5 m/s. Además, la velocidad de propagación presenta un incremento de 1.4 metros por segundo cuando la salinidad se incrementa en 1 %. En cuanto a la presión, esta sube 10 atmósferas cuando el sonido registra un ascenso de 1.8 metros por segundo al bajar 100 metros de profundidad.[7]

Es destacable que estos tres factores no tienen la misma importancia por igual. En las aguas superficiales, tomará un papel más importante el factor de la temperatura por encima de la presión y salinidad, ya que la temperatura en la superficie variará de forma más rápida. [7]

Durante los primeros 50 metros de profundidad, se mantiene un mar con una temperatura constante y donde la presión del agua no afectará prácticamente nada a la velocidad del sonido. No obstante, a partir de los 50 metros hasta prácticamente los 300 metros, el agua se somete a un cambio de temperatura brusco por lo que hace que la velocidad de propagación disminuya. Sin embargo, el cambio de presión y de la salinidad es mayor al de la temperatura y consigue equilibrar el medio subacuático, haciendo que la velocidad de propagación aumente. Este cambio se va a ir intensificando de forma que el fondo marino se vaya acercando.[7]

2.1.4. Impedancia acústica

”La impedancia acústica (Z) es la resistencia que opone un medio a las ondas sonoras que se propagan sobre este y por lo tanto es equivalente a la impedancia eléctrica. Es decir, caracteriza la disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio.”[1]

La impedancia se puede definir como resultado del producto de ρ y c , siendo ρ la densidad del medio y c la velocidad de propagación. Una de las dos unidades de la impedancia es el Rayl, en la tabla 2.1 se observa la diferencia de la impedancia en las ondas acústicas en diferentes medios.

Material	Densidad (Kg/m^3)	Vel.Sonido (m/s)	Impedancia (Rayl)
Aluminio	1.2	331	397
Agua	1030	1531	$1.6 \cdot 10^6$
Aire	2700	6420	$17.3 \cdot 10^6$

Tabla 2.1: Impedancias acústicas en distintos medios
[4]

2.1.5. Ondas esféricas

Cuando se habla de ondas esféricas, se refiere a una propagación de la onda tridimensional. Existen también el modelo de propagación por ondas planas. Sin embargo, en el medio marino las ondas esféricas se adaptan mejor a la realidad, ya que una onda que se propaga va perdiendo energía de forma proporcional al inverso del cuadrado de su distancia.[4]

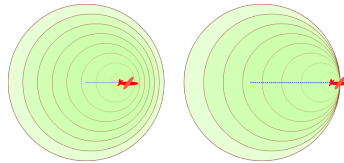


Figura 2.4: Ondas esféricas.
[4]

2.1.6. Propagación en el medio subacuático

La propagación de una onda en el medio subacuático está ligada a su frecuencia y a su velocidad de propagación. Además, esta alta velocidad conlleva una separación de la onda, también llamada multi-trayecto. En este fenómeno, hay pérdidas de transmisión y ruido que determinan la relación señal a ruido, la distancia de una fuente sonora y su ancho de banda.

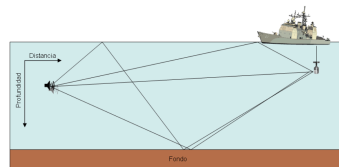


Figura 2.5: Propagación en el medio subacuático, representación del multicamino.
[8]

Las ondas sonoras se pueden reflejar de forma total o parcial según ciertos factores: la velocidad del sonido, su frecuencia y el tipo de objeto contra el que choca la onda sonora.

Además, en nuestras comunicaciones en el medio acuático, siempre se encuentra el ruido, que depende de la situación demográfica, ya que, por ejemplo, en la costa suele haber siempre mucho más ruido artificial, debido a todos los barcos con motores que navegan cerca la misma.

Si se habla de sistemas de propagación acústica marina, se diferencian tres tipos: Sistemas de propagación de largo, medio y de corto alcance.

Se trabajan con sistemas de propagación de largo alcance en un radio de 100 Km y el ancho de banda se limita a pocos kHz. Para los sistemas de medio alcance se trabaja en un radio de 10 Km con un ancho de banda de unos 10 kHz. Finalmente, para sistemas de corto alcance, se trabaja en un radio de 100 metros con un ancho de banda mayor a 100 KHz.[4]

Para crear este tipo de sistemas se necesita usar modelos de propagación para predecir por donde irá la onda, en cuantas ondas se dividirá (multi-trayecto), donde reflejará...etc. La teoría de rayos y la teoría de modos normales son los principales modelos de propagación que se utilizan.

En conclusión, la señal acústica propagada en un medio subacuático es complicada de modelar, debido a todos los fenómenos que puede sufrir, como pueden ser la reflexión, la refracción, la absorción, las pérdidas de propagación, el multi-trayecto, el ruido artificial y ambiental, el ancho de banda...

2.1.7. Multi-trayecto

Como he nombrado anteriormente, el fenómeno multi-trayecto ocurre cuando una onda sonora se divide en varias y cada una toma caminos distintos. Esto ocurre debido a que la onda se refleja tanto en la superficie del agua, como en el fondo marino.

Cada trayectoria de la onda se encontrará con su propio retardo y esto dificultará muchísimo más la captación de la señal para el receptor, esto se debe cuando se usan emisores poco directivos como pueden ser los omnidireccionales. Se deben usar fuentes directivas para que la onda sonora llegue directa de emisor a receptor con las menores reflexiones posibles.

El fenómeno de la propagación multi-trayecto está estrechamente ligado con la profundidad de los océanos. En el caso de aguas profundas, se generan múltiples caminos debido a la curvatura de los rayos, los cuales tienden a dirigirse hacia áreas donde la velocidad de propagación es menor, a este proceso se le denomina eje del canal sonoro profundo. Por otro lado, en aguas poco profundas, se producen reflexiones en la superficie y en el fondo marino, y posiblemente, junto con una ruta directa.[4]

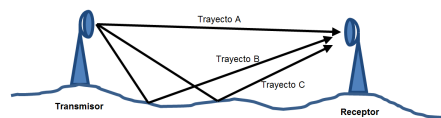


Figura 2.6: Fenómeno que genera la Interferencia entre Símbolos.

[9]

2.1.8. Teoría de rayos

Existen diferentes métodos para poder modelar la propagación acústica en los entornos submarinos. Principalmente, desde los años 60 el modelado del canal acústico ha sido realizado mediante el trazado de rayos. Esta teoría se basa en modelar una onda acústica con rayos normales al frente de onda, los cuales se curvan o refractan en función del medio en el que se encuentren, típicamente en función de la velocidad de propagación.[4]

Para un entorno marino en el que la velocidad es variable y depende de la profundidad, se suele proponer un modelo estratificado con un número finito de capas horizontales, de forma que la velocidad de propagación en cada capa es constante.

De esta manera conseguimos mediante la Ley de Snell, que se pueda evaluar la dirección que tomará un rayo acústico al cambiar de capa.

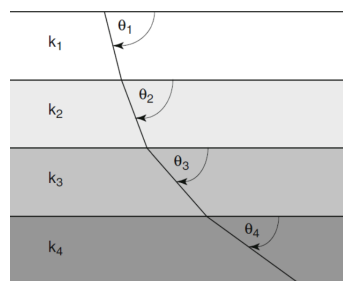


Figura 2.7: Ejemplo de rayo refractado a través de varias capas contiguas.

La combinación de los factores de refracción y velocidad de la onda sonora generan trayectorias predominantes del sonido en la mar. Nos podemos encontrar con cuatro categorías principales:

- Rayo directo
- Rebote en fondo
- Zona de convergencia
- Canal sonoro

La propagación de las ondas sonoras generalmente es una combinación de todas ellas.

2.1.8.1. Ley de Snell

Se aplica a la acústica el concepto de rayo de luz usado en óptica y se interpreta el rayo de sonido perpendicular al frente de ondas acústicas. La ley de Snell se representa en la ecuación 2.3.

$$\frac{\sin\theta_1}{c_1} = \frac{\sin\theta_2}{c_2} = a \quad (2.3)$$

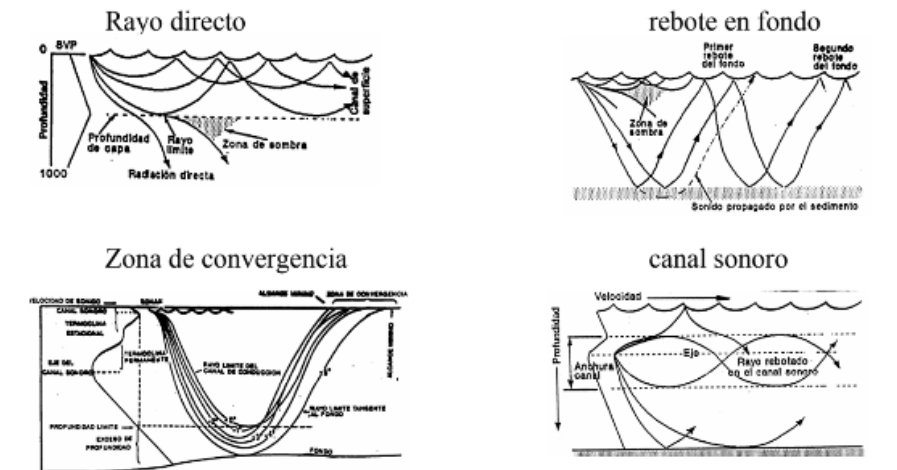


Figura 2.8: Trayectoria Sonora.

[10]

[11]

donde Θ_1 = ángulo del rayo en el medio 1 con respecto a la normal, c_1 = velocidad de propagación del medio 1, Θ_2 = ángulo del rayo en el medio 2 con respecto a la normal y c_2 = velocidad de propagación del medio 2.

2.1.9. Pérdidas de propagación

La trayectoria de una señal acústica que se propaga en el medio marino sufre pérdidas de intensidad debido a distintos mecanismos. En acústica, este término se le denomina pérdidas por transmisión o por propagación, ya que es la medida usada para saber el cambio de intensidad de la señal respecto la distancia alcanzada.

Estas pérdidas de transmisión (TL, Transmission Loss) son esenciales para mantener una comunicación entre emisor-receptor, ya que la relación señal-ruido (SNR) depende indirectamente de estas pérdidas. Cuanto mayor sean las pérdidas de transmisión, más baja resultará su relación señal-ruido (SNR), lo que empeorará la calidad de la señal recibida por el receptor. Estas pérdidas de propagación suelen ser útiles para determinar la calidad de la comunicación entre emisor y receptor.[4]

2.1.9.1. Absorción

El agua del mar es un medio que sufre de procesos de viscosidad y relajación, estos fenómenos provocan una disipación de la señal, también llamada absorción. Si se quiere conocer el coeficiente de absorción del agua se puede usar la ecuación empírica de Thorp mostrada en la ecuación 2.4. Donde la (f) indica frecuencia y la (a) indica atenuación. [4]

$$10\log(a(f)) = \frac{0.11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 0.000275 f^2 + 0.0003 [dB] \quad (2.4)$$

2.1.9.2. Reflexión

Cuando el sonido atraviesa las distintas capas del océano, también llamadas estratos, experimenta fenómenos de reflexión y refracción. El fondo del mar y su superficie son dos elementos que causan reflexión y crean los conocidos 'ecos'.

Hay que tener en cuenta, que no todos los elementos inciden sobre la onda acústica de la misma forma, los objetos aislados y de mayor tamaño que la longitud de onda del sonido producen reflexiones claras y distintas, conocidas como 'ecos'. Sin embargo, los objetos pequeños, irregulares se encargan de generar ecos débiles que se superponen entre sí, dando lugar a la "reverberación". [7]

2.1.9.3. Refracción

Los estratos que forman el agua del mar desempeñan un papel fundamental en el cambio de la velocidad del sonido, ya que provocan una desviación de la dirección de las ondas, conocida como refracción.

Aquí entraría en juego la teoría de rayos explicada anteriormente, la cual utiliza la Ley de Snell para estimar la desviación de la onda entre estratos. [7]

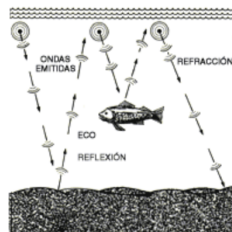


Figura 2.9: Refracción y reflexión del sonido.

2.1.9.4. Dispersión geométrica

Las pérdidas por dispersión geométrica se generan por la separación que la onda acústica sufre a medida que se propaga y se va encontrando con obstáculos. Al atravesar estos obstáculos la señal se separa en varios caminos o desvía su trayectoria, aquí entra en acción la Ley de Snell, explicada anteriormente. [4]

2.2. Ruido

El ruido submarino se refiere a la colección de sonidos no deseados presentes en el entorno acuático. Se pueden distinguir dos tipos: origen natural y origen antropogénico (creado por el humano).

Es una mezcla de diferentes ondas, de diferentes frecuencias y amplitudes que se propagan a través del agua, y puede tener un impacto significativo en los ecosistemas marinos y las actividades humanas relacionadas con el océano.[4]

2.2.1. Relación señal-ruido

La relación señal-ruido (SNR) indica la relación entre la señal acústica deseada y el ruido presente en el entorno acuático. Mediante esta medida, se puede evaluar la calidad de una señal transmitida de emisor a receptor y la cantidad de presencia de ruido submarino.

Una SNR alta indica que la señal deseada es más fuerte en comparación con el ruido de fondo, lo que facilita su detección y procesamiento. Sin embargo, una relación señal-ruido baja significa que la señal está más enmascarada por el ruido, lo que dificulta su detección y puede afectar a la detección de objetos. [12]

2.2.2. Efecto Doppler

El efecto Doppler en el agua es un fenómeno acústico que describe el cambio de la frecuencia en la onda sonora debido al movimiento del medio en el que se propaga, en este caso, el agua. Este efecto es similar al que se puede ver en las ondas de luz o en las ondas sonoras en el aire.[4]

El efecto Doppler puede tener diversas aplicaciones. Por ejemplo, en el caso de la ecolocación utilizada por algunos animales marinos, como los delfines y las ballenas, este efecto les permite detectar y localizar objetos en su entorno. Esto es debido a que pueden analizar los cambios en la frecuencia de los ecos reflejados en función de su movimiento relativo y averiguar si se les acerca algún animal. Este efecto les ayuda a moverse de noche, o en momentos donde el agua está turbia y no tienen una visibilidad completa. Además, a esto se le suma la problemática de la contaminación acústica, debido a los ruidos antropogénicos [12] que el humano genera en el mar, desorienta a muchos mamíferos marinos ya que se les está quitando uno de sus sentidos más desarrollados, el oído.

Además, el efecto Doppler también se tiene en cuenta en investigaciones acústicas marinas, como la detección de objetos en movimiento. Este puede proporcionar información sobre la dirección y la velocidad del movimiento relativo.

2.2.3. Tipos de ruido submarino

El ruido submarino natural se origina a partir de fuentes originadas por el ambiente marino. Pueden ser sonidos producidos por el viento, por las olas, por los chasquidos de los delfines, los cantos de ballena, el crujir de los corales...etc. Estos sonidos naturales juegan un papel fundamental en la comunicación, la orientación y la detección de presas y depredadores para muchas especies marinas.

Por otro lado, el ruido submarino antropogénico se origina a causa de las actividades humanas en el entorno marino. Principalmente es ruido generado por el tráfico marítimo, pero también abarca actividades relacionadas con la explotación de recursos marinos, como la perforación de petróleo y gas. Este tipo de ruido es el causante de una problemática en el entorno acústico marino cada vez

mayor.[12]

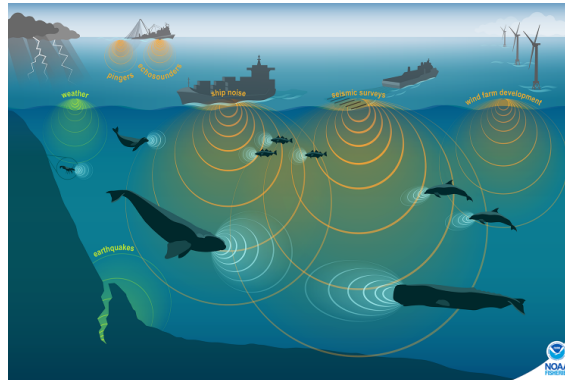


Figura 2.10: Sonidos acústicos que están silenciando el fondo marino.

[13]

2.3. Hidrófonos

Un hidrófono es un tipo de transductor acústico creado para captar y convertir señales de sonido en el agua en señales eléctricas. Los hidrófonos están diseñados para trabajar en ambientes subacuáticos, como lagos, ríos, tanques de agua y océanos.

Los hidrófonos se utilizan en una amplia rama de aplicaciones, entre estas, nos encontramos con: sonares, investigación científica, industria petrolera y gasífera, comunicaciones submarinas...

Los hidrófonos están creados para trabajar en diferentes profundidades y condiciones, y pueden variar en tamaño, sensibilidad y forma. Muchos hidrófonos se encuentran conectados a cables submarinos o a vehículos acuáticos.[14]

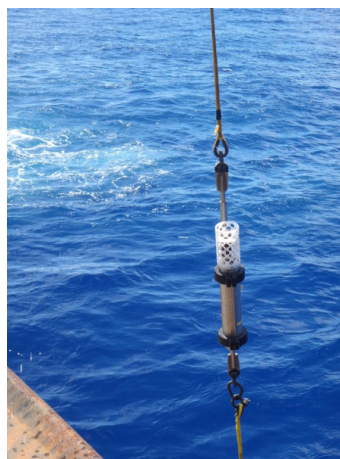


Figura 2.11: Hidrófono a punto de ser fondeado.

[15]

2.4. Sistemas de escucha pasiva y activa

Los sistemas de escucha pasiva y activa son usados hoy en día para la detección, posicionamiento y seguimiento de objetos en el medio marino, como pueden ser faros acústicos, animales marinos, embarcaciones, submarinos... todo esto es posible debido a la captación de señales acústicas.

No obstante, no se debe olvidar, que estos sistemas de escucha también interfieren en cuestiones de privacidad y de impacto en la vida marina, por esta razón, se debe hacer un uso responsable y ético de estos sistemas.

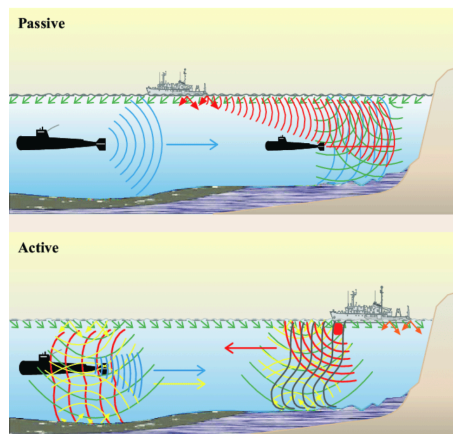


Figura 2.12: Sonar con sistema de escucha pasivo y activo para detección marina.

[16]

2.4.1. Técnicas y aplicaciones de acústica pasiva

Los sistemas de escucha pasiva son sistemas de escucha que se basan en captar señales acústicas sin necesidad de emitir señales acústicas artificiales. Se usan en detección y seguimiento de cetáceos, detección de especies marinas, monitoreo de ecosistemas marinos, entre otras especialidades. Los sistemas de escucha pasiva se pueden desplegar en hidrófonos por las costas marinas para llevar a cabo la captación de vocalizaciones de cetáceos, como pueden ser los rorcuales comunes o los delfines.[17]

2.4.2. Técnicas y aplicaciones de acústica activa

Por otro lado, tenemos los sistemas de escucha activa, usados generalmente para poder emitir sonidos generados artificialmente y así poder captar información del entorno marino. Los sonidos artificiales que se producen suelen ser pulsos o tonos cortos, no más largos de 3 segundos generalmente. Gracias a ellos, se puede localizar o identificar objetos sumergidos en el medio acuático.

Estos sistemas son muy usados en técnicas de geolocalización, dependiendo del tiempo que tarde la señal artificial en reflejarse en el objeto, animal o fondo marino, se puede identificar a cuanta distancia está del sistema de escucha activo.[17]

2.4.2.1. Balizas acústicas

Las balizas acústicas son sistemas de escucha activa, ya que se encargan de emitir señales generadas artificialmente. Estas señales son usadas para la navegación, la comunicación submarina y detección de objetos en el medio marino.

Al emitir estas señales mediante transductores o altavoces, estas se propagan y pueden ser recibidas por otros sistemas de escucha, como los hidrófonos o sonoboyas. Mediante este proceso se podría averiguar la distancia entre los hidrófonos y el faro acústico incluso cuando la visibilidad no fuera la óptima.

2.4.2.2. Sonares

El sonar es un sistema de escucha activo, que se encarga de emitir pulsos en forma de ondas acústicas y luego es capaz de detectar los ecos que le llegan de vuelta al rebotar y convertirse en ecos. Finalmente estas ondas son recogidas o captadas por un transductor o hidrófono, obteniendo información de la distancia, ángulo y posición de la onda emitida.[17]

El sonar es un recurso utilizado frecuentemente en muchos ámbitos, entre los que destacan: la navegación marítima, la exploración y explotación de recursos submarinos, la investigación científica, la defensa y la seguridad marítima.

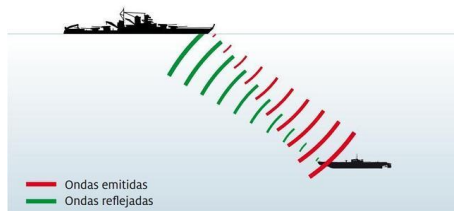


Figura 2.13: Sonar usado para la localización de submarinos.

[18]

2.4.3. Sistema de posicionamiento acústico submarino

Cuando se habla de posicionamiento, se refiere a la capacidad de obtener un punto donde se puede encontrar un animal marino, un faro acústico, una embarcación...etc. Para llevar a cabo este tipo de posicionamientos, se suele desplegar una red de hidrófonos capaces de captar las señales acústicas. Estas, pueden ser producidas por el humano con un transductor o de origen natural, provenientes de un animal.[6]

Existen diferentes tipos de posicionamientos: de largo, medio y de corto alcance, la mayoría sirven para la exploración marina y su investigación oceanográfica, en general, para la industria marítima.

Sistema y Posicionamiento	Distancia
USBL	<10 cm
SBL	20-50 cm
LBL	100-6000m

Tabla 2.2: Tipos de sistemas de posicionamiento.
[6]

2.4.3.1. Sistema de posicionamiento acústico de línea de base ultra corta (USBL)

El sistema USBL (Ultra-Short Base Line), compuesto por un transmisor-receptor, es capaz de calcular tanto el ángulo, como la distancia de un objeto en el medio marino. Este tipo de posicionamiento necesita técnicas más complejas a la hora de procesar las señales. Es preciso, saber la posición exacta del transductor para poder posicionar el objeto con exactitud. Este sistema es muy común debido a su moderado coste y a su fácil uso.[6]

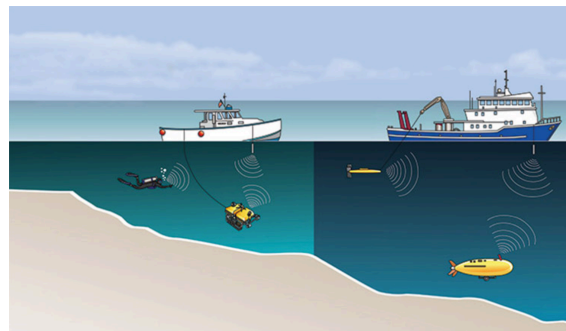


Figura 2.14: Sistema de posicionamiento USBL.
[19]

2.4.3.2. Sistema de posicionamiento acústico de línea de base corta (SBL)

El sistema SBL (Short Base Line) está basado en más de tres transductores, los cuales van conectados a una caja central. Sirve para localizar buzos y vehículos submarinos en tiempo real, las señales acústicas son recibidas por las boyas. Un ejemplo gráfico sería el siguiente:[6]

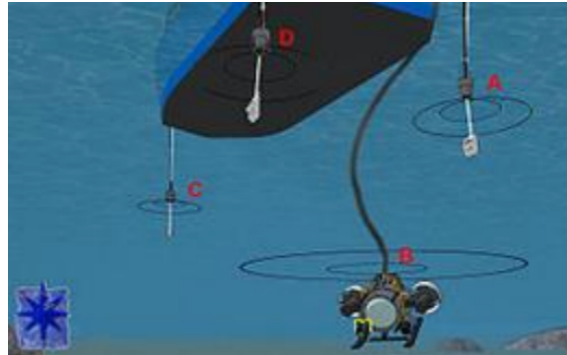


Figura 2.15: Sistema de posicionamiento SBL.
[6]

2.4.3.3. Sistema de posicionamiento acústico de línea de base larga (LBL)

El sistema LBL (Long Base Line) se utiliza a cualquier profundidad y además, es capaz de determinar un posicionamiento exacto del buque u objeto. Este sistema está compuesto por transpondedores, a mayor cantidad, mayor será la precisión. Estos usan técnicas de triangulación para posicionar correctamente el objeto.[6]

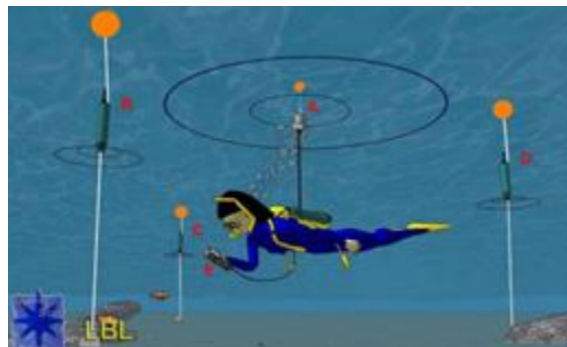


Figura 2.16: Sistema de posicionamiento LBL.
[6]

2.4.4. Señales Chirp, MLS y TSP

En este proyecto se ha trabajado con tres tipos de señales distintas.: TSP (Time-Stretched Pulse), MLS (Maximum Length Sequence), y Chirp. Todas las señales utilizadas se definen como señales de banda ancha, es decir, que la energía está distribuida uniformemente en todo el espectro frecuencial.

Para las señales TSP y MLS el espectro frecuencial depende directamente de la frecuencia de muestreo. Según el teorema de Nyquist el contenido frecuencial está limitado a la mitad de frecuencia de muestreo.

Por otro lado la señal Chirp también sufre la limitación por la frecuencia de muestreo, pero además, en esta señal se define el rango frecuencial de trabajo.

2.4.4.1. Señales Chirp

Los barridos frecuenciales son señales deterministas, que son capaces de conseguir una mejor relación señal ruido y una mayor robustez frente a los cambios en la varianza temporal de las señales del ruido. Si aumentamos la duración del barrido, se mejorará considerablemente la relación señal ruido.

$$u(t) = \sin(\phi + 2\pi(f_0t + 0.5h_1t^2)) \quad (2.5)$$

2.4.4.2. Señales MLS

Las señales MLS son secuencias de valores pseudoaleatorios que nos permiten obtener la respuesta al impulso del sistema a partir de la correlación cruzada de la señal de excitación y los registros del acelerómetro. Aparte de tener una gran resistencia al ruido de fondo, también preserva la información de fase.

2.4.4.3. Señales TSP

Se trata de un pulso 'estirado en el tiempo' propuesto por Aoshima (ATSP). Las señales TSP se usan principalmente para medir señales acústicas con amplios rangos dinámicos y con impulsos muy largos. Su fórmula se representa como en la fórmula 2.6. [tsp]

$$H(k) = \begin{cases} a_0 \exp(j4m\pi k^2/N^2) & \text{si } 0 \leq K \leq N/2, \\ H(n-k) & \text{si } N/2 < K < N, \end{cases} \quad (2.6)$$

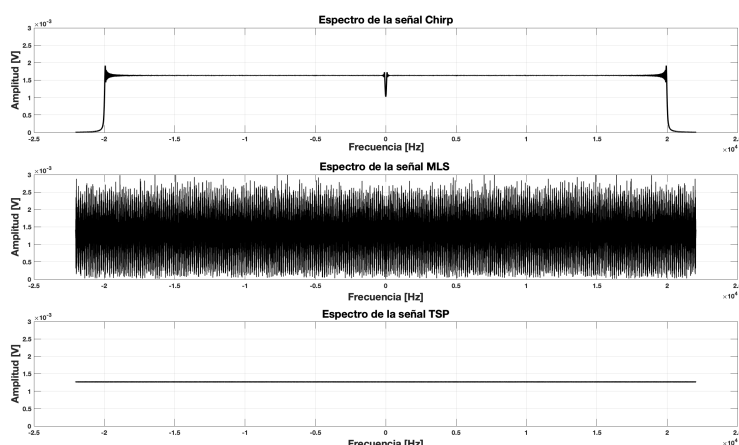


Figura 2.17: Espectros de las señales Chirp, MLS y TSP.

2.4.5. Tiempo de vuelo (ToF)

El tiempo de vuelo es el tiempo TOF que transcurre desde que la señal es transmitida desde el emisor hasta que es recibida.

$$t = \frac{d}{v} [s] \quad (2.7)$$

[6]

donde la v indica velocidad en m/s, la d la distancia en metros y t denomina el tiempo en segundos.

Se puede calcular con distintos algoritmos, como por ejemplo, la detección por umbral y la detección por correlación.

La detección por correlación se basa en calcular el retardo de dos señales en función de su similitud.

$$r_{xy}[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n-k] \cdot y[n] \quad (2.8)$$

Si se obtiene el máximo de correlación se puede calcular el retardo temporal entre las señales de emisión y recepción. Para calcular ese retardo se ha usado la fórmula 2.9.

$$ToF = (MPCC - \frac{ls}{2}) \cdot \frac{1}{FS} [s] \quad (2.9)$$

Donde ls es la longitud de la correlación, MPCC (Maximum Peak Cross Correlation) es la muestra donde se encuentra el máximo de la correlación cruzada, y FS es la frecuencia de muestreo

La detección por umbral sigue además distintos criterios, como la detección del inicio de la señal a partir de un valor x de la desviación estándar y detección del inicio de la señal a partir de una caída de decibelios desde el máximo de la señal.[20]

2.4.6. Diferencia de intensidades

Si se dispone de dos elementos en el medio marino, uno de ellos como emisor y el otro como receptor, se puede calcular la distancia mediante la atenuación de la intensidad de la señal acústica. Mediante la fórmula de la ley del inverso del cuadrado de la intensidad.

El primer paso constará en medir tanto la intensidad emitida, como la recibida, de esta forma, se establecerá relación entre ellas dos en la fórmula 2.10:

$$I_r = I_e / 4\pi r^2 \quad (2.10)$$

siendo I_r la intensidad recibida, I_e la intensidad emitida, r la distancia entre emisor y receptor. Si se despeja la r , se da la ecuación 2.11:

$$r = \sqrt{\frac{I_e}{4 \cdot \pi \cdot I_r}} \quad (2.11)$$

Capítulo 3

Metodología

3.1. Montaje experimental

En este TFG se propone realizar un montaje experimental para la emisión de señales de amplio espectro y su adquisición con dos hidrófonos para que sirva de base de un sistema de posicionamiento implementable en plataformas submarinas fijas o móviles.

3.1.1. Captación de la señal audible

Se ha realizado un posicionamiento de un objeto mediante la simulación de una plataforma submarina con un hidrófono a cada extremo de esta, separados por una distancia de un metro y medio. Como prueba, se ha usado una vara con dos hidrófonos de tipo Aquarian H2d y un transductor Lubell VC2C colocado perpendicularmente a 2 metros de la vara.

Quedando una distribución como el de la figura 3.1:

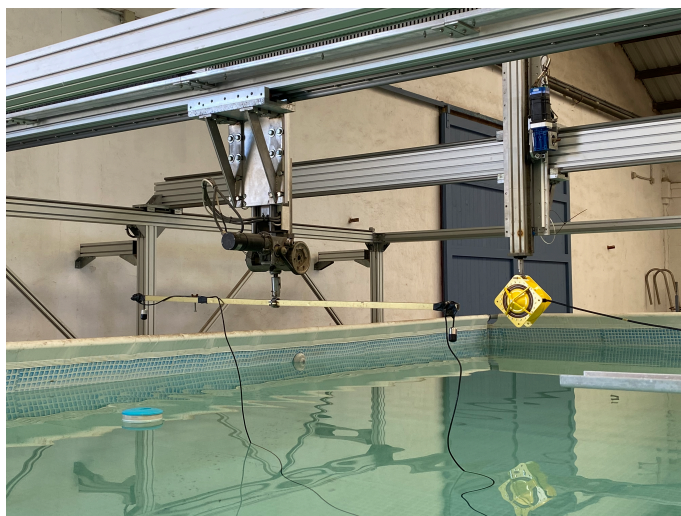


Figura 3.1: Tanque de agua con los 2 hidrófonos y el altavoz.

Para llevar a cabo la obtención de las señales que están dentro del espectro audible se han establecido tres posiciones y cada cual consta de 5 ángulos. En la figura 3.2 se muestra un plano cenital donde se indica la posición de los hidrófonos y el proyector para cada una de las tres posiciones (A, B y C)

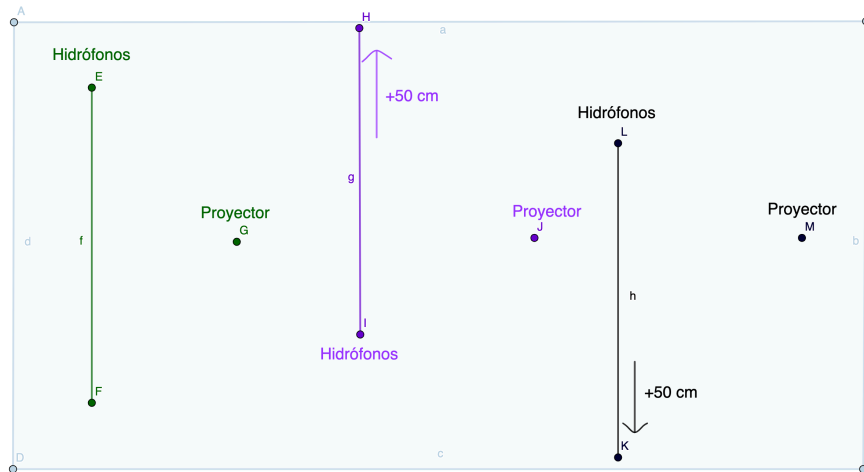


Figura 3.2: Posición A (verde), Posición B (morado), Posición C (negro).

Se han usado cinco ángulos distintos, hemos rotado la vara en 0, 15, 30, 45 y 90 grados, como se ve en la figura 3.3:

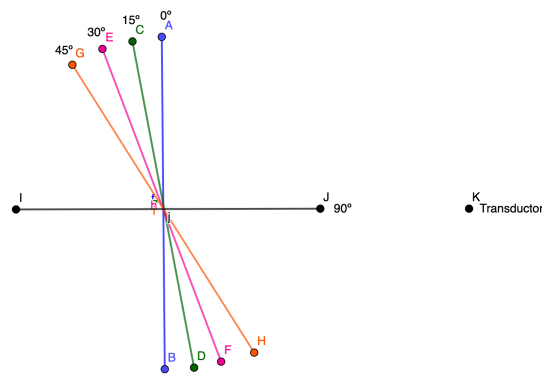


Figura 3.3: Distintos ángulos usados.

Teniendo en cuenta que se han tomado seis muestras por cada posición y ángulo, se ha tomado un total de 6 muestras x 5 ángulos x 3 posiciones x 3 tipos de señales = 180 medidas en total.

3.1.2. Materiales usados

Osciloscopio: Se ha usado este instrumento de medición electrónico para poder registrar las señales, visualizarlas y guardarlas para su posterior análisis.

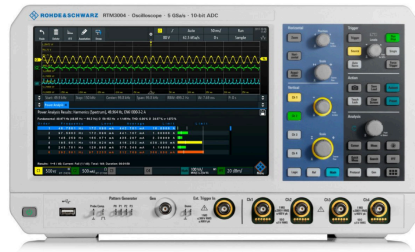


Figura 3.4: Osciloscopio Rohde Schwarz RTM 3000.

Grabadora: Se ha hecho uso de la grabadora como elemento pasivo para poder adaptar las impedancias, ya que habían impedancias muy distintas entre los hidrófonos y el osciloscopio.



Figura 3.5: Grabadora TASCAM.

Amplificador: El amplificador incrementa la señal, de forma que excita con más potencia el transductor (también llamado proyector).



Figura 3.6: Amplificador Bosch 240W.

Ordenador: Con el ordenador se ha emitido las señales ya generadas anteriormente.

Tanque de agua: El tanque de agua se encuentra en los tinglados del Puerto de Gandía. Donde se ha introducido el sistema de posicionamiento en el para llevar a cabo las mediciones.

Proyector: El proyector usado se encuentra en la figura 3.7, se trata del transductor Lubell VC2C,

encargado de la emisión de la distintas señales. Este proyector es eficiente sobretodo en bajas frecuencias, por lo que las señales emitidas tendrán una mayor contribución energética en bajas frecuencias.

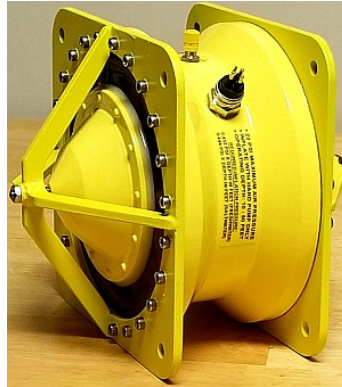


Figura 3.7: Transductor Lubell VC2C.

Hidrófonos H2d: Los hidrófonos se han encargado de recibir la señales, que posteriormente se han analizado.



Figura 3.8: Hidrófonos H2d.
[21]

3.1.3. Circuito usado

En la figura 3.9, se observa el circuito usado para la captación de señales audibles.

La señal se genera en el ordenador y se incrementa en el amplificador para llegar directamente al proyector. La señal es emitida por el proyector y se propaga por el medio hasta llegar a los hidrófonos encargados de registrar la señal. Los hidrófonos transformaran la variación de presión percibida en una señal eléctrica. La señal eléctrica es adaptada por la grabadora TASCAM y finalmente la señal queda registrada en el osciloscopio donde es almacenada en una memoria USB.

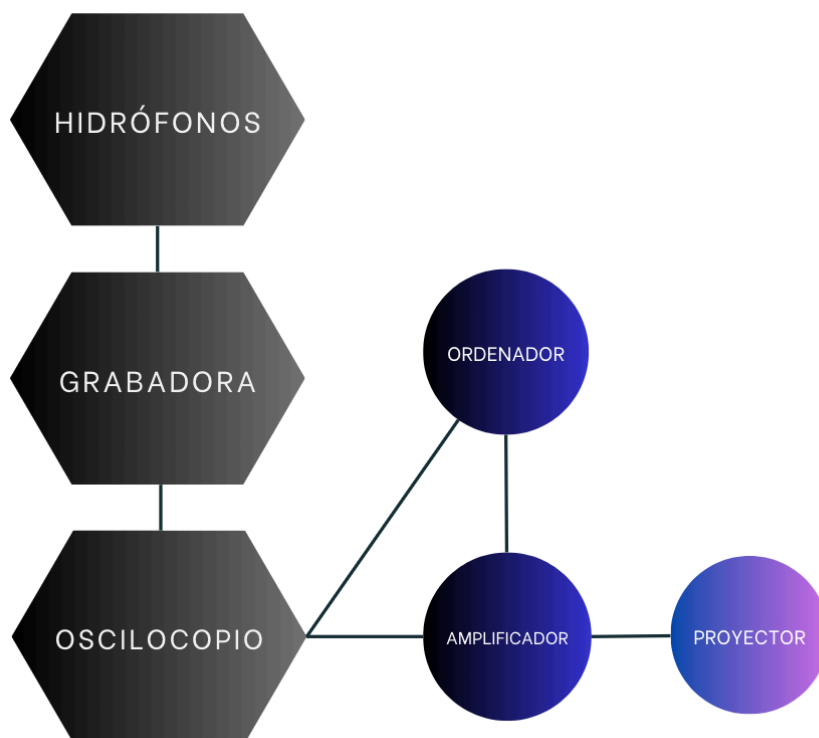


Figura 3.9: Circuito usado para la medición de señales audibles.

3.1.3.1. Cálculo de la variable distancia**3.1.3.2. Tiempo de vuelo TOF (time of flight)**

Asumiendo la velocidad de propagación en el mar (c), se ha despejado la distancia que hay entre emisor y receptor:

$$d = c \cdot TOF \quad (3.1)$$

[6]

Mediante el método de la correlación cruzada se ha localizado el índice correspondiente al máximo de correlación que está asociado al retraso en muestras con la señal de referencia. Con esto, se ha calculado el tiempo de vuelo. Para averiguar la distancia entre el hidrófono y el transductor se ha multiplicado el tiempo de vuelo por la velocidad del sonido en el medio de agua dulce del tanque del tinglado.

3.1.3.3. Cálculo de la variable ángulo

Mediante el teorema del coseno se ha obtenido el ángulo de la fuente respecto al hidrófono.

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad \Rightarrow \quad A = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right) \quad (3.2)$$

[22]

La figura del triángulo se puede asumir como un sistema cartesiano y por lo tanto realizar operaciones vectoriales para obtener las distancias y ángulos.

Se ha calculado las distancias y el ángulo respecto al hidrófono 1 con la fuente aplicando las siguientes ecuaciones:

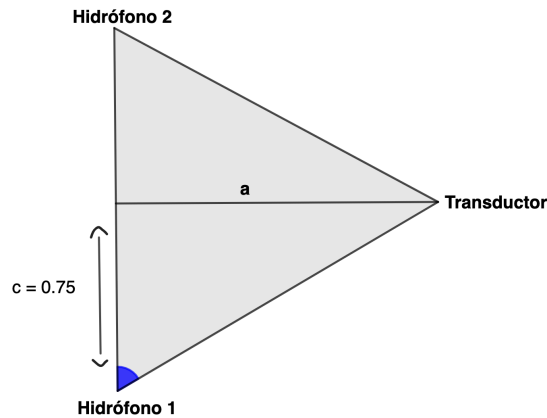


Figura 3.10: Vista del cálculo de ángulo para la posición A.

Para la posición A, se debe sacar el ángulo marcado en la figura 3.10. Para llevar a cabo este cálculo, se ha usado la ley del seno y coseno. Sabiendo que en esta posición **a** es igual a 2 metros y **c** es igual a 0.75 metros. La posición H1 que hace referencia al hidrófono 1, tiene coordenadas en el eje X e Y, es decir su punto definido es $H1(h(x),h(y))$, donde $h(x) = 0.75 \cdot \sin(\alpha)$ y $h(y) = -0.75 \cdot \cos(\alpha)$.

Se ha calculado el lado **b** (la hipotenusa del triángulo inferior) con el módulo del vector entre las posiciones del hidrófono 1 y de la fuente. Al averiguar **b** y tener **c** y **a**, se aplica la ley del coseno mostrada en la ecuación 1.2 para obtener el ángulo.

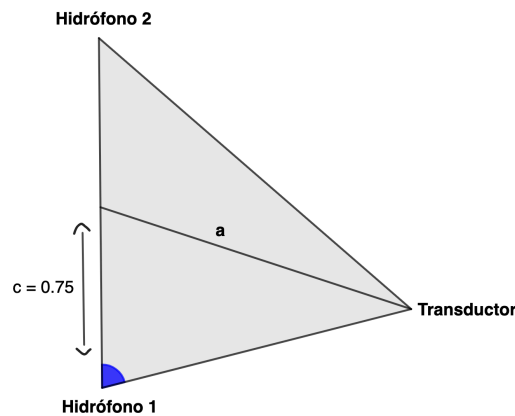


Figura 3.11: Vista del cálculo de ángulo para la posición B.

Para la posición B, se debe sacar el ángulo marcado en la figura 3.11. Para llevar a cabo este cálculo, se ha vuelto a usar la ley del seno y coseno. Sabiendo que en esta posición **c** es igual a 0.75 metros y **a** ya no es igual a 2 metros. La posición H1 que hace referencia al hidrófono 1, tiene coordenadas en el eje X e Y, es decir su punto definido es $H1(h(x),h(y))$, donde $h(x) = 0.75 \cdot \sin(\alpha)$ y $h(y) = -0.75 \cdot \cos(\alpha) + 0.5$. Se le suma 0.5 metros porque el centro de la barra se desplaza hacia

arriba 50 centímetros.

Se ha calculado la distancia de **a**, con el módulo del vector entre las posiciones del centro la vara y la fuente) y **b** (la hipotenusa del triángulo inferior) con el módulo del vector entre las posiciones del hidrófono 1 y de la fuente. Al averiguar **a** y **b** y disponer de **c**, se aplica la ley del coseno mostrada en la ecuación 1.2 para obtener el ángulo.

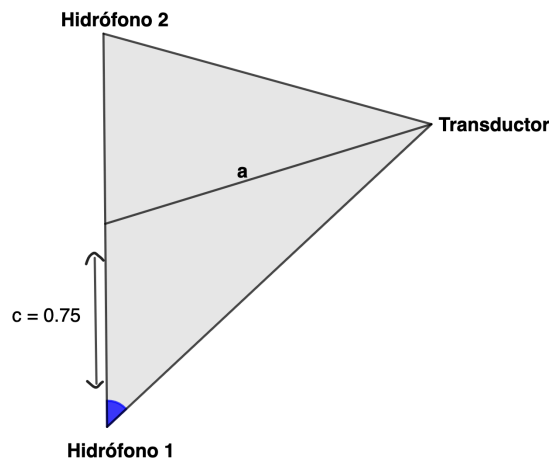


Figura 3.12: Vista del cálculo de ángulo para la posición C.

Finalmente para la posición C, se debe sacar el ángulo marcado en la figura 3.12. Para llevar a cabo este cálculo, se ha vuelto a usar la ley del seno y coseno. Sabiendo que en esta posición **c** es igual a 0.75 metros y **a** no es igual a 2 metros. Se ha vuelto a definir un punto H1 como en la posición B pero esta vez restándole a la coordenada del eje y -0.5, porque bajamos el centro de la vara 50 cm, quedando así: $h(x) = 0.75 \cdot \sin(\alpha)$ y $h(y) = -0.75 \cdot \cos(\alpha) - 0.5$.

Se ha calculado la distancia de **a** y **b** (la hipotenusa del triángulo inferior) con el módulo del vector entre las posiciones del hidrófono 1 y de la fuente. Y se ha vuelto a calcular el ángulo con la ley del coseno.

3.1.4. Calibración del sistema de adquisición de señales acústicas

Aunque el sistema ya esté previamente calibrado, la recalibración es necesaria debido a que se añade un elemento que altera el sistema. En nuestro caso, este elemento es la grabadora, un elemento pasivo que se ha usado para adaptar las impedancias de los hidrófonos a la del osciloscopio.

Para conocer la nueva sensibilidad del sistema debemos usar un sistema de referencia que se sabe que está calibrado, el cual consta de un hidrófono Bruel y un sistema de adquisición llamado Nexus (acondicionador de la señal). El sistema a calibrar consta de un hidrófono H2d, una grabadora de

mano y del osciloscopio. Además, gracias al hidrófono de referencia se puede conocer la presión radiada por el proyector Lubell.

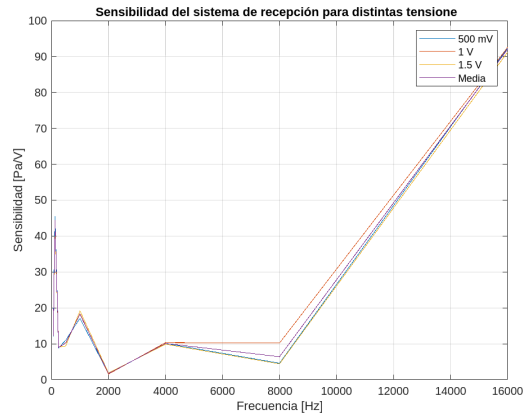


Figura 3.13: Sensibilidad en función de distintas tensiones para la señal emisión.

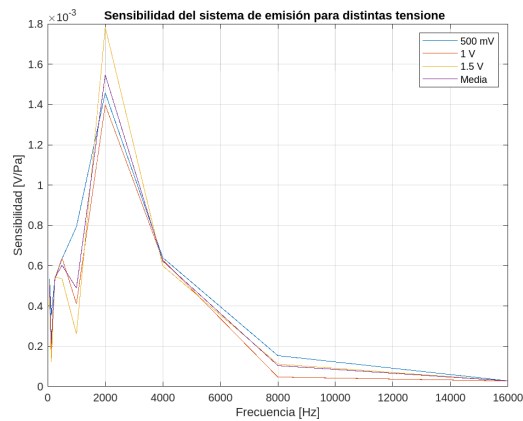


Figura 3.14: Sensibilidad en función de distintas tensiones para la señal emisión.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Resultados correlaciones

A continuación, en este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de las amplitudes del máximo de correlación en todas sus configuraciones y para cada una de sus señales.

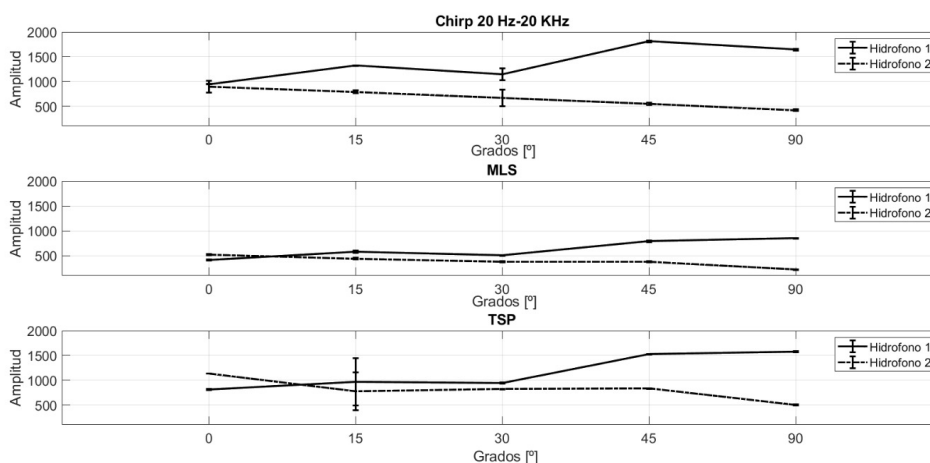


Figura 4.1: Correlaciones Posición A

Se observa en la figura 4.1, que cuando se emplea la señal Chirp, la tendencia de la amplitud en el hidrófono 1 aumenta con el cambio de ángulos, indicando que el hidrófono 1 se va acercando del transductor. Mientras que el valor de la amplitud con el ángulo en el hidrófono 2 disminuye, significando que se va alejando más del transductor con el cambio de ángulos. Además, la amplitud de la señal indica una mayor resistencia al ruido de fondo y una mayor intensidad debido a que el hidrófono 1 se acerca al proyector. También se han calculado las desviaciones estándar, ya que se han promediado las seis muestras tomadas para cada posición, se distinguen en las gráficas como líneas verticales. Se aprecia una desviación en el ángulo 0, de 117.37 y una desviación más notable en el ángulo 30, de 171.62, esto indica una variación en las medidas tomadas, aún así no es una desviación grande a comparación a los valores de las medias.

Cuando se emplea la señal MLS, se observa que la evolución de la amplitud con la fase en el hidrófono 1 aumenta y la del hidrófono 2 disminuye al igual que en el caso anterior con la señal Chirp. Sin embargo, se puede ver una menor amplitud, lo cual indica que está menos incorrelada con el ruido de fondo, es decir, tiene una menor resistencia al ruido de fondo.

Finalmente empleando la señal TSP, se observan las mismas tendencias pero esta vez con una desviación mayor en el ángulo 15, de 10.05 .

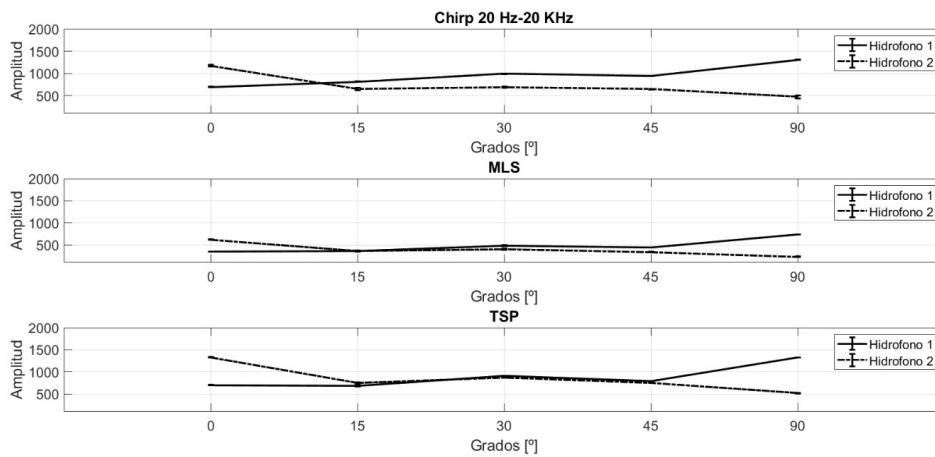


Figura 4.2: .Correlaciones Posición B

En la figura 4.2, está representada la posición B. Se observa empleando la señal Chirp una menor amplitud en comparación con la posición A y una menor desviación.

Si empleamos la señal MLS, podemos ver como las tendencias del hidrófono 1 e hidrófono 2 tienen valores muy similares, aún así se observa como el hidrófono 1 se acerca del proyector mientras que el hidrófono 2 sigue alejándose.

Finalmente, con la señal TSP, vuelven a tener valores muy similares las dos tendencias, además se observa una tendencia creciente en el hidrófono 1 y una tendencia decreciente en el hidrófono 2.

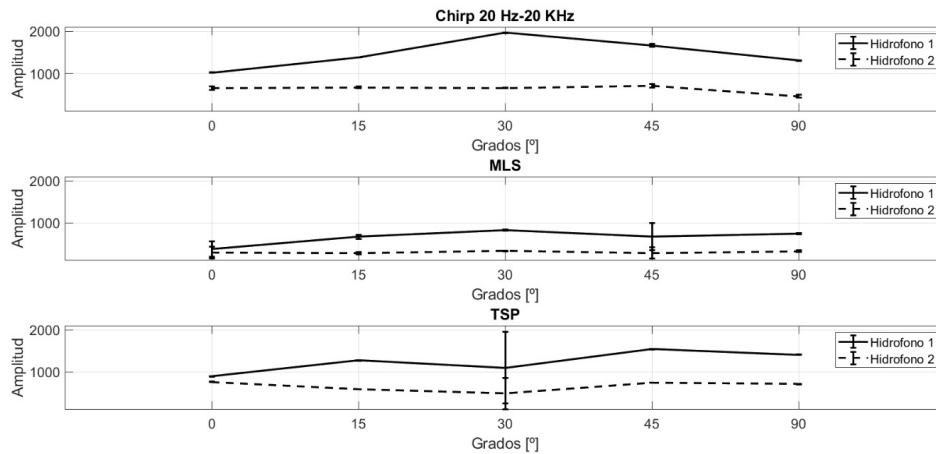


Figura 4.3: Correlaciones Posición C

En la figura 4.3, se representan los resultados relativos a la posición C. Usando la señal Chirp, se aprecia una tendencia creciente en el hidrófono 1 respecto al valor inicial hasta el ángulo 30 y luego decreciente hasta 90. Esta parte decreciente no se corresponde con lo esperado, esto puede darse por la suma de alguna reflexión u otro caso externo. En cuanto la tendencia del hidrófono 2, se mantiene de manera decreciente respecto a su punto inicial.

Usando la señal MLS, siguen las mismas tendencias que en las posiciones A y B, pero con una amplitud menor, siendo más sensible al ruido de fondo y con una mayor desviación en el ángulo 45, de 10.49, indicando una variación de las muestras.

Finalmente, empleando la señal TSP, se ven las mismas tendencias, el hidrófono 1 alejándose del proyector y el hidrófono 2 acercándose a él. A destacar, la gran desviación en el ángulo 30, de 4.59, donde las muestras tomadas difieren entre ellas más de lo esperado.

4.2. Resultados distancias

A continuación, en este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de las distancias teóricas y experimentales en todas sus configuraciones y para cada una de las señales empleadas.

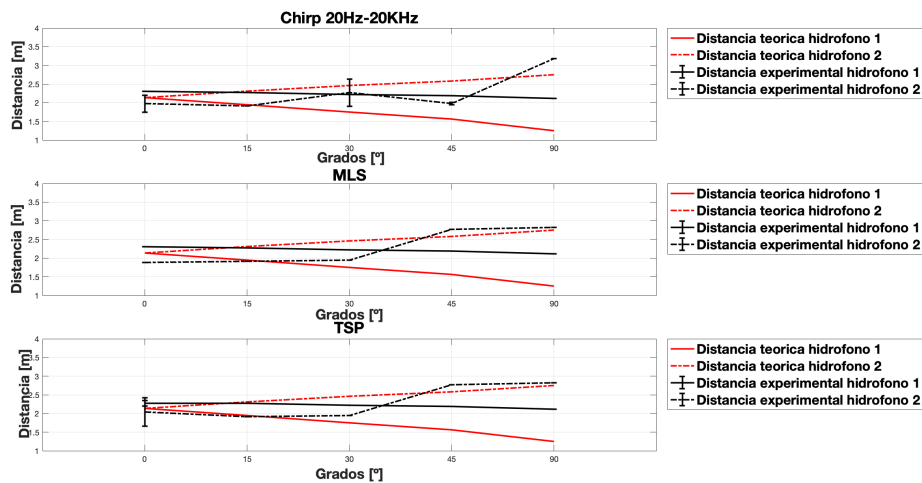


Figura 4.4: Distancias Posición A

En la figura 4.4, se muestran los resultados referentes a la posición A. Usando la señal Chirp se observa una concordancia en las tendencias de las distancias del hidrófono 1 teórico con la del hidrófono 1 experimental, las dos son crecientes. Al igual que con el hidrófono 2 teórico y el hidrófono 2 experimental, las dos tendencias son decrecientes. Sin embargo, los valores teóricos no coinciden exactamente con los valores experimentales por factores externos. Se aprecia una desviación notable en el ángulo 30.

Usando la señal MLS y TSP, se observan las mismas tendencias, con la particularidad de que, los valores se aproximan más a los teóricos pero siguen sin coincidir del todo. En la señal TSP, se aprecia una mayor desviación en el ángulo 0 en comparación con las otras dos señales.

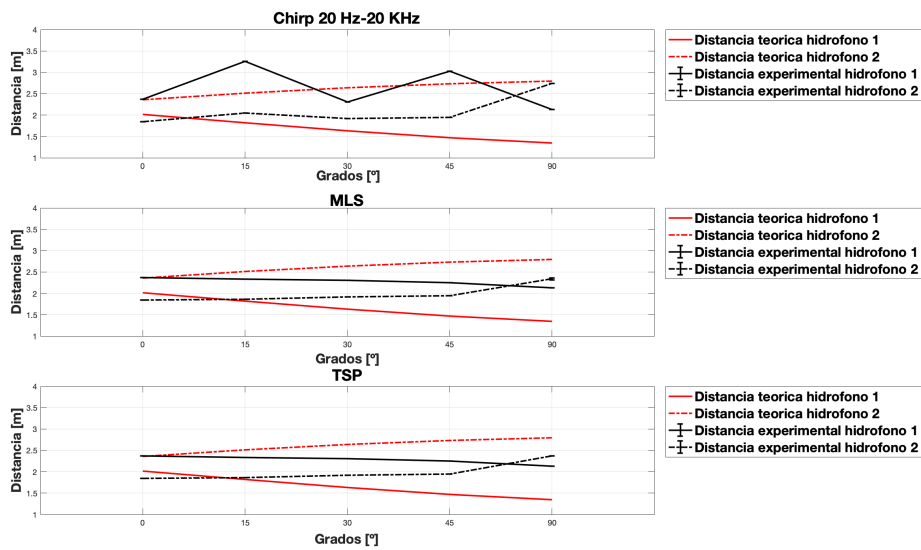


Figura 4.5: Distancias Posición B

En la figura 4.5 se muestran los resultados para la posición B. En la señal Chirp, se aprecian las mismas tendencias crecientes para el hidrófono 1 teórico y experimental y decrecientes para el hidrófono 2 teórico y experimental. Sin embargo, siguen sin coincidir los valores teóricos con los prácticos y se observa una mayor diferencia de valores al emplear la señal Chirp en comparación con la señal MLS y TSP.

En cuanto la señal MLS y TSP, nos encontramos con las mismas tendencias y con valores teóricos y experimentales un poco más parecidos pero sin llegar a ser iguales.

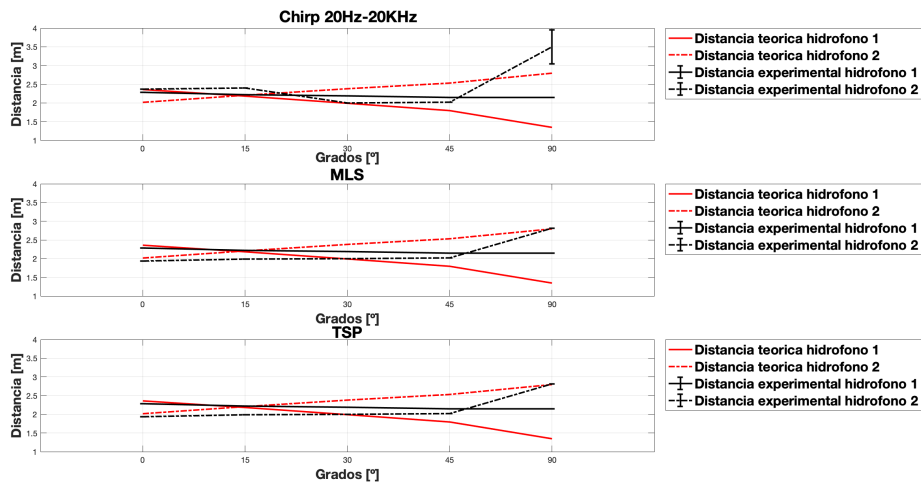


Figura 4.6: Distancias Posición C

En la figura 4.6 se muestran los resultados relativos a la posición C. En la señal Chirp, se puede apreciar una mayor desviación del hidrófono 2 experimental en el ángulo de 90 grados. Por lo demás, las tendencias siguen concordando pero los valores no son iguales a los teóricos.

En las señales TSP y MLS volvemos a tener una similitud entre ellas dos. Las tendencias vuelven a concordar pero los valores experimentales siguen sin ser iguales a los teóricos.

4.3. Resultados ángulos

A continuación, en este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos de la estimación de los ángulos de inclinación del eje de los hidrófonos respecto de la dirección de propagación del sonido generado por el transductor, en todas sus configuraciones y para cada una de sus señales.

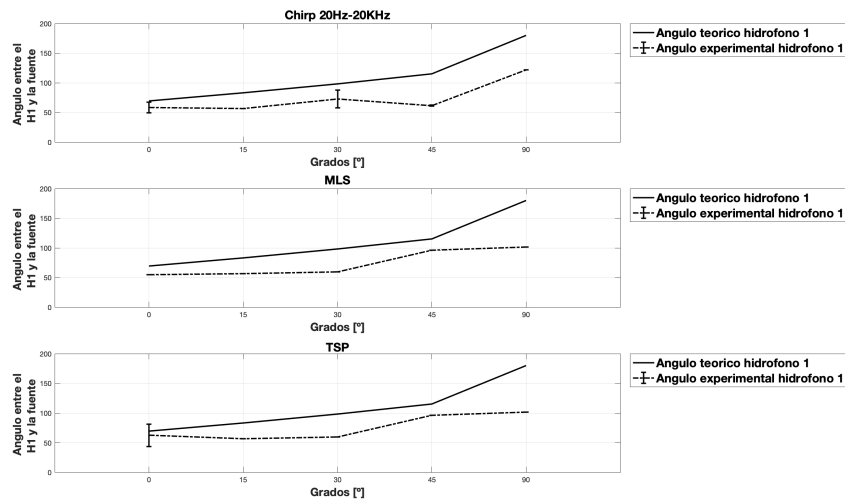


Figura 4.7: Ángulos Posición A

La figura 4.7 muestran los resultados para la posición A. Empleando la señal Chirp, se aprecia unas tendencias crecientes tanto para el ángulo teórico como experimental. Sin embargo, los valores angulares teóricos no se asemejan a los experimentales, por lo tanto, no está posicionando el objeto de una forma precisa. Se aprecia una desviación mayor en los 30 grados, de 72.8038, lo que indica diferencia en los valores tomados en ese ángulo.

Se ve otra vez una similitud con las señales TSP y MLS, las dos señales con tendencias crecientes pero sin los mismos valores experimentales que teóricos. Al emplear la señal TSP se aprecia una alta desviación estándar, de 54.5295 grados, cuando el sistema esta en el ángulo 0.

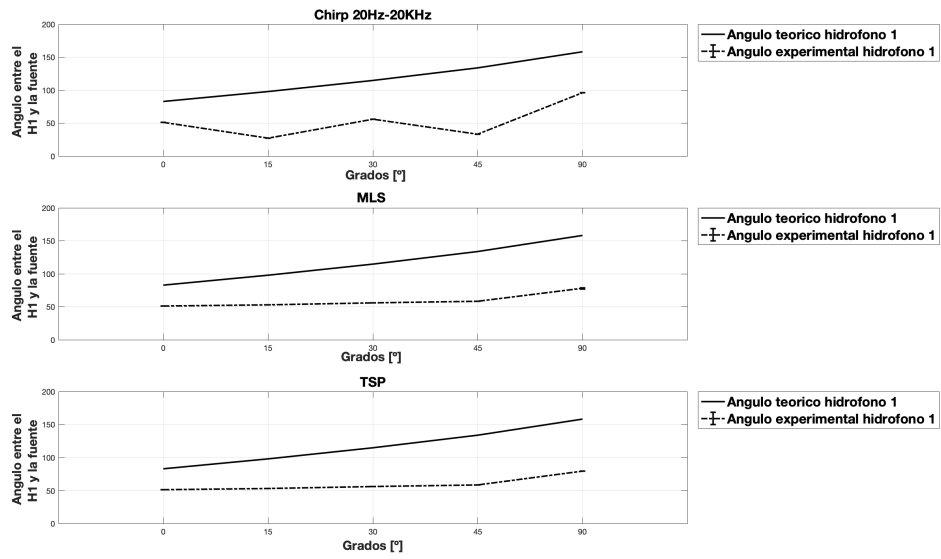


Figura 4.8: Ángulos Posición B

La figura 4.8 muestra los resultados para la posición B. En esta figura se observa lo mismo que en la anterior pero esta vez con una amplitud mayor, lo que indica que para esta configuración hay una mayor resistencia al ruido de fondo.

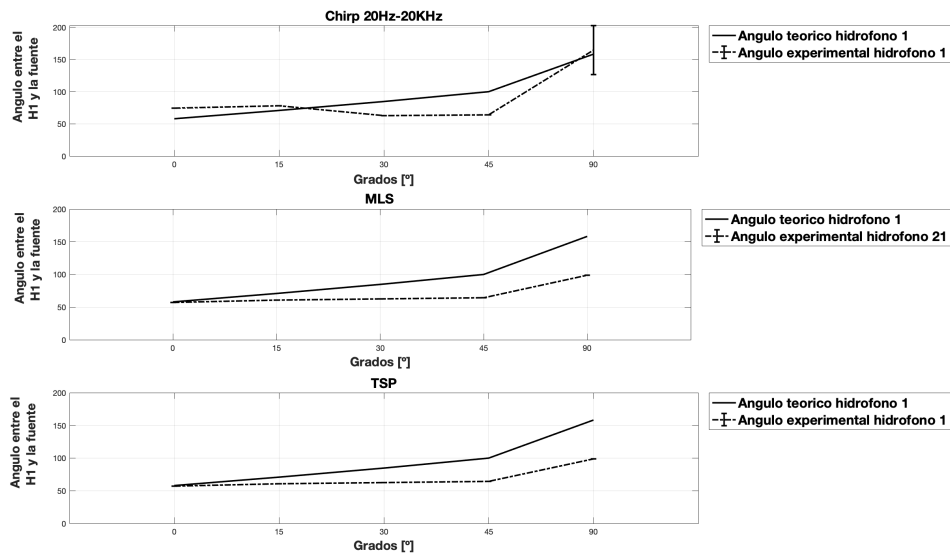


Figura 4.9: Ángulos Posición C

Finalmente, en la figura 4.9 se observa los resultados para la posición C. Empleando la señal Chirp se ve una mayor semejanza en los valores pero no llegan a ser los mismos, las tendencias son crecientes tanto para los ángulos teóricos como experimentales. Se aprecia una desviación notable cuando el sistema se encuentra en el ángulo 90 respecto al proyector.

Los resultados vuelven a ser similares al emplear las señales TSP y MLS, sus tendencias teóricas concuerdan con las experimentales, son crecientes. Sin embargo, siguen sin concordar los valores angulares teóricos con los experimentales.

4.4. Discusión de los resultados

En cuanto a las desviaciones de las distancias, se observa que la desviación nula o pequeña de los valores para distancias en los distintos ángulos, se debe a que el retardo del tiempo de vuelo respecto a la emisión y a la recepción casi siempre cae en la misma muestra. Esto podría llegar a variar si se cambiara la frecuencia de muestreo. Aunque se esté cumpliendo el teorema de Nyquist, ya que se supera el doble de la frecuencia máxima que se está emitiendo, si se aumenta la frecuencia de muestreo podría repercutir en una mayor variación de las medidas.

Si se habla de la diferencia de valores para las distancias, entre el valor inicial y final para cada una de las señales. Se puede observar que para la señal Chirp, en la posición A, se ha obtenido un valor teórico inicial de la distancia de 2.136 metros y un valor final de 2.75 metros, siendo la diferencia teórica de 0.614 metros. En cuanto la diferencia experimental, se ha obtenido un valor inicial de 2.3025 y un valor final de 2.1176, siendo la diferencia experimental de 0.184 metros.

Para la señal MLS, se han obtenido los mismos valores teóricos y experimentales por lo tanto la diferencia teórica es de 0.614 metros y la diferencia experimental es de 0.184 metros.

Para la señal TSP, se han vuelto a obtener los mismos valores teóricos y experimentales que en la MLS y Chirp.

La diferencia de resultados de los teóricos a los experimentales puede ser debido a una suma de reflexiones por la poca profundidad del tanque. Además, en el rango de frecuencias en el que se ha trabajado (de 20Hz a 20KHz), la separación entre los hidrófonos no es suficiente, porque debería ser mayor que la mitad de la longitud de onda y para 20Hz sería una distancia de 140 metros entre los hidrófonos para que no hubiera aliasing espacial.

En cuanto a la diferencia de valores para los ángulos, entre el valor inicial y final para cada una de las señales. Se puede ver usando la señal Chirp, que para los ángulos se ha obtenido un valor teórico inicial del ángulo de 69.4440 grados y un valor final de 180 grados, siendo la diferencia teórica de 110.5 grados. En cuanto la diferencia experimental, se ha obtenido un valor inicial de 58.1909 grados y un valor final de 121.8830 grados, siendo la diferencia experimental de 63.69 grados.

Con la señal TSP, se ha obtenido el mismo valor teórico inicial del ángulo, 69.4440 grados y un valor final de 180 grados, siendo la diferencia teórica de 110.5 grados. En cuanto la diferencia experimental, se ha obtenido un valor inicial de 54.52 grados y un valor final de 101.2361 grados, siendo la diferencia experimental de 38.92 grados.

Usando la señal MLS, se han obtenido los mismos valores teóricos y experimentales que la señal TSP, siendo la diferencia teórica de 110.5 grados y la experimental de 38.92 grados.

De los resultados obtenidos, gracias a sus tendencias crecientes y decrecientes se ha podido determinar si el ángulo entre el hidrófono y la fuente está en aumento o no, sabiendo así, si la fuente se encontraría angularmente más cerca o más lejos.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones y líneas futuras

En primer lugar, se puede determinar a partir de los resultados obtenidos que el sistema de adquisición utilizado nos permitiría adquirir los picos de correlación con bastante precisión, porque la desviación obtenida es muy pequeña o nula.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, podemos concretar que al emplear la señal Chirp ofrece una mayor amplitud de correlación, es decir, es una señal más resistente al ruido de fondo. Sin embargo, el empleo de las señales TSP y MLS, proporcionan una SNR menor y por lo tanto, no ser tan eficientes respecto al ruido de fondo.

Además, si se quisieran usar estas señales para codificación, la Chirp es más fácil de codificar que la TSP y la MLS, ya que la Chirp es más versátil para poder controlar su contenido espectral.

En cuanto la estimación de la distancia, podemos concretar si la fuente se está alejando o acercando, pero no con un valor exacto. Ya que, las tendencias han indicado correctamente cuando el hidrófono 1 se acercaba al transductor y cuando el hidrófono 2 se alejaba del transductor. Los valores teóricos no han concordado con los experimentales, y por lo tanto, no podemos determinar la distancia precisa. El sistema utilizado trabaja a frecuencias muy bajas por lo que no serviría con distancias cortas sino que sería más eficiente posicionando fuentes a distancias más lejanas.

Angularmente, como se ha explicado anteriormente en las distancias, podemos concluir que el sistema es sensible a los cambios angulares. Gracias a las tendencias experimentales podemos saber si está aumentando o disminuyendo el ángulo, pero no conocer su ángulo exacto.

Como trabajo futuro y tema de para el desarrollo de una tesis de máster, se propone hacer experimentos en el puerto de Gandía, llevando a cabo este proyecto en alta mar. Volviendo a probar el sistema de posicionamiento de forma fija o móvil en agua salada, usando dos hidrófonos con una mayor sensibilidad para poder ganar precisión.

También se espera poder realizar un seguimiento del objeto y poder representar la ruta tomada por el vehículo o animal en una interfaz gráfica.

Capítulo 6

Anexos

6.1. Cálculo de los ángulos teóricos

```
clear all; close all;clc;
```

ÁNGULO POSICIÓN A

```
a = 2;  
c = 0.75;
```

```
alpha = [0 15 30 45 90];  
H1_x= 0.75 * sind(alpha);  
H1_y= -0.75 * cosd(alpha);
```

```
b = sqrt((a-H1_x).^2+(0-H1_y).^2)  
Ang_A = acosd((c.^2+b.^2-a.^2)./(2.*c.*b))
```

ÁNGULO POSICIÓN B

```
c_B = 0.75;  
a_B = sqrt((2^2+0.5^2));
```

```
H1_x=0.75 * sind(alpha);  
H1_y= -0.75 * cosd(alpha)+0.5;
```

```
b_B = sqrt((a-H1_x).^2+(0-H1_y).^2)  
Ang_B = acosd((c_B.^2+b_B.^2-a_B.^2)./(2.*c_B.*b_B))
```

ÁNGULO POSICIÓN C

```
c_C = 0.75;  
a_C = a_B;
```

```
H1_x = 0.75 * sind(alpha);  
H1_y = -0.75 * cosd(alpha)-0.5;
```


$$b_C = \sqrt{(a-H1_x)^2+(0-H1_y)^2}$$
$$\text{Ang}_C = \text{acosd}((c_C.^2+b_C.^2-a_C.^2)/(2.*c_C.*b_C))$$

6.2. Cálculo de la distancia teórica del hidrófono 2 al proyector.

Distancia teórica de Hidrófono 2 al Proyector -> POSICIÓN A

$$H2_x = -0.75 * \text{sind}(\alpha);$$
$$H2_y = 0.75 * \text{cosd}(\alpha);$$
$$H2_p = \sqrt{(2-H2_x)^2+(0-H2_y)^2}$$

POSICIÓN B

$$H2_x = -0.75 * \text{sind}(\alpha);$$
$$H2_y = 0.75 * \text{cosd}(\alpha)+0.5;$$
$$H2_p = \sqrt{(2-H2_x)^2+(0-H2_y)^2}$$

POSICIÓN C

$$H2_x = -0.75 * \text{sind}(\alpha);$$
$$H2_y = 0.75 * \text{cosd}(\alpha)-0.5;$$
$$H2_p = \sqrt{(2-H2_x)^2+(0-H2_y)^2}$$

Listado de siglas empleadas

LBL Long Base Line.

MLS Maximum Length Sequences.

MPCC Maximum Peak Cross Correlation.

SBL Short Base Line.

SNR Signal to Noise Ratio.

SONAR SOund NAVigation and Ranging.

TL Transmission Loss.

TOF Time Of Flight.

TSP Time-Stretched Pulse.

USBL Ultra-Short Base Line.

Bibliografía

- [1] Wikipedia. *Acústica subacuática* — *Wikipedia, La enciclopedia libre*. [Internet; descargado 17-mayo-2023]. 2023. URL: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ac%C3%BAstica_subacu%C3%A1tica&oldid=151222404.
- [2] Herman Medwin. *Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography*. Cambridge University Press, 2005, pág. 596. ISBN: 0-521-82950-X. URL: <https://books.google.es/books?id=NisMJjej184C&lpg=PR4&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>.
- [3] Argentina Public university in Rosario. “Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures”. En: *Proceedings of the IEEE* (), pág. 9. URL: <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/histacus.pdf>.
- [4] Aaron Isaac López Tacoronte. “Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos”. Tesis de Grado. Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad la Laguna, Julio 2017. URL: <https://riull.uil.es/xmlui/bitstream/handle/915/5941/Propagacion%20de%20ondas%20acusticas%20en%20espacios%20subacuaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [5] Enrique Castaño. *Parámetros del movimiento ondulatorio*. 2016. URL: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/2016/03/09/parametros-del-movimiento-ondulatorio/#:~:text=La%20ecuaci%C3%B3n%20de%20onda%20es,a%20su%20posici%C3%B3n%20de%20equilibrio..>
- [6] RUBÉN DARÍO PAUCAR PAUCAR. “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE POSICIONAMIENTO SONAR PARA LA LOCALIZACIÓN DE OBJETOS EN AMBIENTES ACUÁTICOS”. TRABAJO DE TITULACIÓN. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2018. URL: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9257/5/98T00212.pdf>.
- [7] Marcela Frías M. Juan Luis Cifuentes Lemus Pilar Torres-García. *El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería*. Publicado en México, 1995. ISBN: 968-16-2388-6. URL: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_2.html.
- [8] Enrique García; Ana Jiménez; Fernando Álvarez Joaquín Aparicio. “Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I)”. Artículo. Departamento de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura. URL: https://www.geintra-uah.org/system/files/modelos_de_propagacion_de_senales_acusticas_en_entornos_subacuaticos_i_y_ii-vdef.pdf.

- [9] Albentia Systems. *Modulación OFDM*. jueves 5 septiembre, 2013. URL: <https://blog.albentia.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>.
- [10] SAES de Electrónica Submarina. *Trayectoria Sonora de los distintos tipos de rayos*. 11 de enero de 2023. URL: <https://es.slideshare.net/CeliaZurdoPerlado/electronica-submarina-1pdf>.
- [11] Diego Minhava Lopes. *Teoría de rayos*. 9 de febrero de 2014. URL: <https://web.fe.up.pt/~ee09167/14-03-09.html>.
- [12] Rafael Arques Carbonell. “Calibración de un sistema acústico pasivo para el seguimiento del descriptor 11 de la Directiva Europea de Estrategia Marina”. Tesis de Master. Master en Ingeniería Acústica, UPV Campus de Gandia, 2016. URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/90003/ARQUES%20-%20Calibraci%C3%B3n%20de%20un%20sistema%20ac%C3%BAstico%20pasivo%20para%20el%20seguimiento%20del%20descriptor%2011%20de%20la%20di...pdf?sequence=1>.
- [13] NOAA Greater Farallones National Marine Sanctuary. *Ocean Noise*. 12 de junio de 2023. URL: <https://farallones.noaa.gov/eco/whales/ocean-noise.html>.
- [14] Douglas H. Cato. “Simple methods of estimating source levels and locations of marine animal sounds”. En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 104 (Septiembre 1998), pág. 13. ISSN: 1520-8524. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.424379>. URL: <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/104/3/1667/554746/Simple-methods-of-estimating-source-levels-and>.
- [15] Colaboradores de UsaTodayTech. *Hidrófono*. Julio 2015. URL: <https://eu.usatoday.com/story/tech/nation-now/2016/03/04/listen-sounds-deepest-part-ocean-noaa-challengers-deep/81311380/>.
- [16] Ramraj Saini. *Sonares activo y pasivo*. 28 de febrero de 2023. URL: <https://www.careers360.com/premium/how-probability-and-statistics-help-in-tracking-the-movement-of-submarines>.
- [17] J. Burczynski. “Introducción al sistema de sonar para la estimación de biomasa de peces”. Book. Centro de entrenamiento Acústico, Noruega. URL: <https://books.google.es/books?id=mWBOSMVJ1DMC&lpg=PA3&ots=z1e5PuvdQ5&dq=que%20es%20un%20sonar&lr&pg=PA3#v=onepage&q=que%20es%20un%20sonar&f=false>.
- [18] Alejandro Fernández Blanco. *El cetáceo metálico*. 15 de octubre de 2014. URL: <https://www.elsnorkel.com/2014/10/asdic-el-cetaceo-metalico.html>.
- [19] EdgeTech. *The Leader in Underwater Technology*. URL: <https://www.edgetech.com/product/usbl-broadband-acoustic-tracking-system-bats/>.
- [20] Álvaro Lloret Gaona. “Caracterización ultrasónica de las constantes elásticas de resinas dopadas con grafeno para aplicaciones odontológicas”. Tesis de Máster. UPV Campus de Gandia. URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/179562/Lloret%20-%20Caracterizacion%20ultrasonica%20de%20las%20constantes%20elasticas%20de%20resinas%20dopadas%20con%20grafeno%20p...pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [21] Aquarian. *Aquarian Hidrófono H2d*. URL: <https://www.aditech-uw.com/es/tienda/6553-aquarian-hidrfono-h2d.html>.

- [22] Superprof. *Teoremas del seno y coseno - Definición y aplicaciones*. 2020. URL: <https://www.superprof.es/apuntes/escolar/matematicas/trigonometria/teoremas-del-seno-y-coseno.html>.