

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Técnicas numéricas aplicadas a la propagación de sonido en el medio marino. ”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Andrea Vicenta Remiro Gargallo

Tutor/a:

Isabel Pérez Arjona

Cotutores:

Manuel Bou Cabo

Patricia Ordoñez Cebrian

GANDIA, 2019

Resumen

Como bien indica unas de las características más importantes y nos concierne a la mayoría de nosotros dentro de la aplicación de la propagación acústica en el marco de la estrategia marina (MSFD), es que el medio marino es un patrimonio precioso que debe protegerse, preservarse y, cuando sea posible, restaurarse con el objetivo final de mantener la biodiversidad y proporcionar océanos y mares diversos y dinámicos que sean limpios, saludables y productivos. Este trabajo de final de grado trata sobre como afectan las diferentes características como la velocidad, la profundidad y el rango marino, a la hora de la propagación del sonido en el mar. Se analizan dos técnicas como la teoría de rayos y la ecuación de onda parabólica, las cuales se simularán mediante los programas Matlab y Bellhop, con datos reales para la posterior comparación, y así establecer las diferencias y similitudes de ambos métodos de cara a estudios o investigaciones posteriores.

Palabras clave

Sonido, Estrategia marina, Propagación, Parabólica , Rayos.

Abstract

As it indicates some of the most important characteristics and concerns most of us within the application of acoustic propagation in the framework of the marine strategy (MSFD), it is that the marine environment is a precious heritage that must be protected, preserved and, when possible, be restored with the ultimate goal of maintaining biodiversity and providing diverse and dynamic oceans and seas that are clean, healthy and productive. This final degree project is about how different characteristics such as speed, depth and marine range affect the sound propagation at sea. Two techniques are analyzed such as the theory of rays and the parabolic wave equation, which will be simulated by Matlab and Bellhop programs, with real data for later comparison, and thus establish the differences and similarities of both methods for studies or subsequent investigations.

Key words

Sound, Marine strategy, Propagation, Parabolic, Rays.

Índice

RESUMEN	1
PALABRAS CLAVE	1
ABSTRACT	2
KEY WORDS	2
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. MOTIVACIÓN	6
1.2. OBJETIVOS	7
1.3. MARCO HISTÓRICO	7
2. ACÚSTICA SUBMARINA	9
2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.2. APLICACIONES	12
3. MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	14
3.1. EL SONIDO Y SU PROPAGACIÓN	14
3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO	18
3.2.1. Nivel de presión.....	18
3.2.2. Velocidad del sonido.....	21
4. MÉTODOS NÚMEROS DE SIMULACIÓN APLICADOS A LA ESTRATEGIA MARINA	24
4.1. TEORÍA DE RAYOS	25
4.2 INTEGRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ONDA PARABÓLICA.....	29
5. PROCEDIMIENTO Y METODOLOGÍA	32
6. RESULTADOS	34
6.1 VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO	35
6.2 VELOCIDAD VARIABLE Y FONDO PLANO.....	37
6.3 VELOCIDAD VARIABLE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN	40
6.4 VELOCIDAD VARIABLE Y FONDO BATIMÉTRICO REAL	42
7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	44
8. BIBLIOGRAFÍA	46

Tabla de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. ROBERT FULTON, INGENIERO E INVENTOR ESTADOUNIDENSE QUIEN GARANTIZÓ LA CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER BARCO A VAPOR DE LA HISTORIA. [3]	8
ILUSTRACIÓN 2. MODELO INFORMÁTICO DE PROPAGACIÓN EN EL MEDIO MARINO. [17]	10
ILUSTRACIÓN 3. PROCESO DE REVERBERACIÓN DEBIDO A LA SUPERFICIE, EL FONDO Y UNA REGIÓN CON BURBUJAS PRESENTE EN EL AGUA.[15]	12
ILUSTRACIÓN 4. LAS ONDAS SONORAS PUEDEN LLEGAR A DISTORSIONARSE NOTABLEMENTE SI ENCUENTRAN UNA CAPA DE AGUA DE DIFERENTE DENSIDAD. EN TAL CASO SE PUEDEN CREAR "ÁREAS SOMBRA" (2) DONDE EL SONAR (1) NO PENETRA. [3] [15].....	13
ILUSTRACIÓN 5. PERFIL TÍPICO PARA LATITUDES MEDIAS. FUENTE : JESÚS UREÑA	23
ILUSTRACIÓN 6. MOVIMIENTO PERPENDICULAR DE ONDA PLANA. [19].....	26
ILUSTRACIÓN 7. MEDIO HOMOGÉNEO. [19].....	26
ILUSTRACIÓN 8. FRENTES DE ONDA NO ESFÉRICOS. [19]	27
ILUSTRACIÓN 9. EL TRAZADO DE RAYOS UTILIZADO PARA LOCALIZAR FRENTES DE ONDA ACÚSTICOS PROPAGÁNDOSE A TRAVÉS DE LA DENSIDAD VARIABLE DEL OCÉANO. EL CAMINO PUEDE SER OBSERVADO OSCILANDO EN EL CANAL SOFAR.....	28
ILUSTRACIÓN 10. PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y LA PROFUNDIDAD, PARA EL ENTORNO DE AGUAS POCO PROFUNDAS. [17]	31

Tabla de gráficas

GRÁFICA 1. VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO (63 Hz)	36
GRÁFICA 2. VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO (125 Hz)	36
GRÁFICA 3. VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO (250 Hz)	36
GRÁFICA 4. VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO (1000 Hz)	37
GRÁFICA 5. VELOCIDAD CONSTANTE Y FONDO PLANO (2000 Hz)	37
GRÁFICA 6. PERFIL DE VELOCIDAD VARIABLE	38
GRÁFICA 7. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO PLANO (63 Hz)	38
GRÁFICA 8. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO PLANO (125 Hz)	39
GRÁFICA 9. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO PLANO (500 Hz)	39
GRÁFICA 10. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO PLANO (1000 Hz)	39
GRÁFICA 11. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO PLANO (2000 Hz)	40
GRÁFICA 12. BATIMETRÍA CON FONDO EN FORMA DE ESCALÓN	40
GRÁFICA 13. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN (63 Hz)	41
GRÁFICA 14. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN (125 Hz)	41
GRÁFICA 15. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN (500 Hz)	42
GRÁFICA 16. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN (1000 Hz)	42
GRÁFICA 17. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO EN FORMA DE ESCALÓN (2000 Hz)	42
GRÁFICA 18. FONDO BATIMÉTRICO REAL	43
GRÁFICA 19. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO BATIMÉTRICO REAL (63 Hz)	43
GRÁFICA 20. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO BATIMÉTRICO REAL (125 Hz)	44
GRÁFICA 21. VELOCIDAD GRADIENTE Y FONDO BATIMÉTRICO REAL (500 Hz)	44

1. Introducción

1.1. Motivación

El Proyecto de Fin de Grado que a continuación se presenta, forma parte del Grado en Ingeniería en Telecomunicaciones, Sonido e Imagen impartido en la Escuela Politécnica Superior de Gandía, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia.

Dicho proyecto versa sobre la acústica, exactamente en el campo de la acústica submarina, y los diferentes métodos matemáticos de propagación en el medio marino, y urge de varias asignaturas cursadas a lo largo del grado, como Acústica, Propagación (cursadas durante el segundo curso), Ingeniería Acústica Ambiental (Cuarto Curso), otras, en las cuales se hizo una pequeña introducción a lo que presenta este trabajo.

Una vez finalizado el grado, se despertó el interés en el campo de la acústica submarina. Es por ello por lo que Isabel Pérez Arjona (tutora) me puso en contacto con Manuel Bou Cabo (Co-tutor) y Patricia Orodñez Cebrian (Co-tutora), para poder compartir la información necesaria acerca del proyecto que tenía preparado y del cual podría presentar como trabajo final de grado.

El poder aplicar todos los conocimientos adquiridos a lo largo del grado sobre ondas, propagación de estas, acústica y comunicaciones fue uno de los motivos principales para desarrollar este proyecto, ya que lo consideré una característica importante y de gran interés. Por otra parte, en este proyecto se utilizaron programas ampliamente conocidos en este ámbito como es Matlab, (que desde primer curso del grado ha estado presente en la mayoría de las asignaturas).

La estrategia marina es una motivación también para empezar a realizar estos estudios y dentro de ellos, fijar unos objetivos que pueden ser resueltos en su totalidad aquí o base para futuras investigaciones. Como bien indica unas de las características más importantes y nos concierne a la mayoría de nosotros dentro de la aplicación de la propagación acústica en el marco de la estrategia marina (MSFD), es que el medio marino es un patrimonio precioso que debe protegerse, preservarse y, cuando sea posible, restaurarse con el objetivo final de mantener la biodiversidad y proporcionar océanos y mares diversos y dinámicos que sean limpios, saludables y productivos. A este respecto, la Directiva debería, entre otras cosas, promover la integración de las

consideraciones medioambientales en todos los ámbitos políticos pertinentes y ofrecer el pilar medioambiental de la futura política marítima para la Unión Europea. [1]

En la fase de investigación y documentación acerca del estado del arte del tema se descubrió una herramienta de gran utilidad, presentada por Manuel Bou, pero muy compleja de usar llamada Bellhop. Formando parte también de nuestros objetivos simplificarla y añadir nuevas funcionalidades.

1.2. Objetivos

Desde el comienzo del desarrollo del proyecto, los objetivos estuvieron definidos. Por una parte, condensar en un proyecto los conocimientos aprendidos en diversas asignaturas de la carrera y, por otro lado, realizar un estudio de convergencia entre ambos métodos de propagación, estudiando la variación de resultados de estos atendiendo a apertura de la fuente, variación del perfil batimétrico o de velocidad del sonido en columna de agua.

1.3. Marco histórico

A lo largo de los últimos 100 años, el uso del mar para comunicaciones submarinas ha ganado importancia, siendo usadas, por ejemplo, en la monitorización de diversos parámetros medioambientales, transmisión de voz entre submarinistas, análisis del fondo marino, sónar, y control de vehículos marinos entre otros. [2]

En este proyecto nos centraremos en uno de los usos más comunes de esta rama, la aplicación de la estrategia marina, en el cual evaluaremos a partir del ruido acústico de origen antropogénico (principalmente causado por el tráfico marino) los distintos métodos de propagación.

Hay muchos tipos de energía antropogénica que las actividades humanas introducen en el ambiente marino incluyendo sonido, luz y otros campos electromagnéticos como el calor y energía radiactiva. Entre estos, el tipo de antropogénico más extendido y generalizado es la energía que desprende el sonido submarino.

Es muy probable que los niveles de entradas de sonido y de los efectos sobre el ecosistema marino hayan ido aumentando desde la llegada de barcos a vapor. Los organismos que están expuestos al sonido pueden verse afectados

negativamente tanto en una corta escala de tiempo (efecto agudo) o, por el contrario, en una larga escala de tiempo (efectos permanentes o crónicos). Los efectos adversos pueden ser generalizados y la Comisión Europea decidió en septiembre de 2010, que los dos indicadores de ruido subacuático se utilicen para describir el BEA (Buen Estado Ambiental) o en inglés GES (Good Environmental Status).

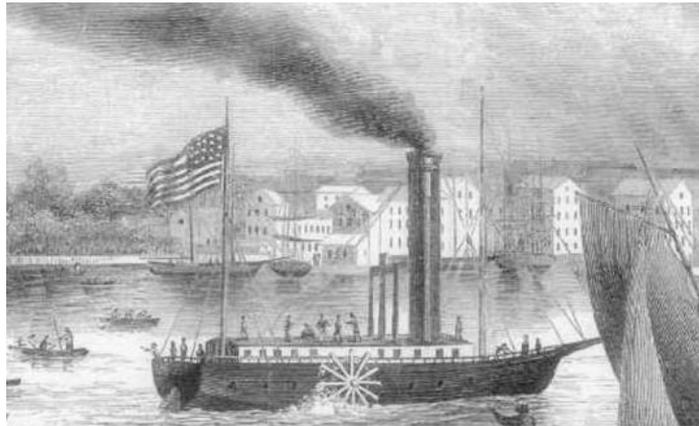


Ilustración 1. Robert Fulton, ingeniero e inventor estadounidense quien garantizó la construcción del primer barco a vapor de la historia. [3]

En cuanto a la propagación del sonido en el mar, se trata de un canal que presenta dos grandes problemas, por un lado, la velocidad de propagación del sonido en el agua no es constante, lo que hace que la trayectoria de los rayos sonoros sea curva, y por otro lado, las ondas acústicas se propagan a través de un medio finito definido por el fondo marino y la superficie, fronteras en las que se produce una reflexión prácticamente total debido al fuerte cambio de impedancia. [4]

Es por ello por lo que en los últimos años se ha experimentado un creciente interés por la aplicación de técnicas acústicas, en diferentes ámbitos de trabajo en el medio marino, saliendo del ámbito militar en el que se encontraban inicialmente y alcanzados objetivos al uso de la acústica submarina tanto a nivel empresarial como de investigación del medio marino. [5]

Este proyecto se centrará en analizar con datos reales dos de las grandes técnicas de la propagación del sonido en el medio marino, como son la teoría de rayos y la ecuación de onda parabólica. En el proyecto se realizarán las simulaciones considerando los datos experimentales de salinidad, temperatura y profundidad recogidos mediante una boya ARGO en el mar Mediterráneo,

con esos datos se ha calculado la velocidad de la ecuación de Mackenzie donde:

Velocidad del sonido en el agua (Mackenzie, 1981) [6][7]

c = Velocidad del sonido (m/s)

a = Coeficiente de absorción (dB / m)

T = Temperatura (° C)

S = Salinidad (ppt)

D = Profundidad (m)

F = Frecuencia (kHz)

$$c = 1448.96 + 4.591 T - 0.05304 T^2 + 2.374 \times 10^{-4} \quad (1)$$

donde $-2 < T < 30$; $25 < S < 40$; $0 < D < 8000$

Para llevar a cabo este trabajo, se planificó el desarrollo de este en las siguientes fases: Investigación (en el cual se buscó información acerca del tema y se definieron los objetivos y características principales). Una vez reunida la información suficiente se procedió a la comparación de dos métodos de propagación, Bellhop comúnmente aceptado por la comunidad científica como herramienta de propagación aplicando la teoría de rayos, y la implementación en Matlab del método de integración de la ecuación de onda parabólica 2D, resuelta mediante diferencias finitas aplicando la discretización de Crank Nicholson. Y por último la fase de análisis, en la cual se extrajeron los resultados y se determinaron las conclusiones.

2. Acústica submarina

2.1. Fundamentos teóricos

La acústica submarina, es una disciplina que estudia la generación, propagación y análisis de los sonidos, su comportamiento y transmisión en el agua.

Las ondas electromagnéticas, en comparación con las ondas acústicas, poseen limitantes al momento de emplearse como flujo de información submarina, esto es debido a que el medio submarino posee características de buen conductor eléctrico y por ende, se presenta una elevada atenuación con

el aumento de la distancia debido a la conversión de la energía del campo eléctrico en calor.

Por otro lado, la propagación del sonido en el mar, depende principalmente de las características del medio, la velocidad del sonido en el mar se ubica alrededor de los 1500 m/s, y aumenta a medida que incrementa la compresibilidad (propiedad de la materia a la cual hace que todos los cuerpos disminuyan el volumen al someterlos a una presión o compresión determinada manteniendo constantes otros parámetros) del medio, la cual depende directamente de la temperatura, la salinidad y la presión. [10][12]

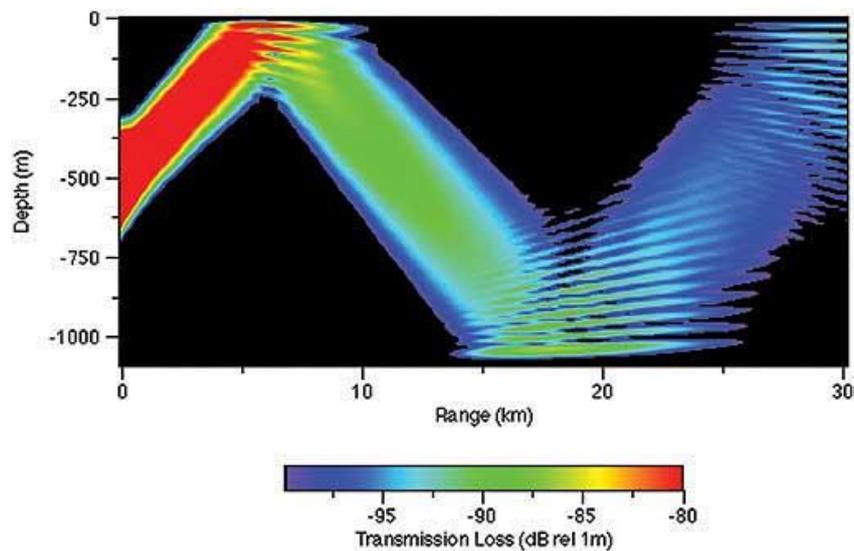


Ilustración 2. Modelo informático de propagación en el medio marino. [17]

La propagación de estímulos sonoros es compleja debido a las diversas interferencias que se pueden dar en el medio analizado; la velocidad de estos en el agua de mar es bastante mayor que en el aire, donde se propaga a 350 metros por segundo. [21] Estas particularidades llevan a la existencia de zonas o “canales de propagación”, los que se comportan como “guías de ondas” permitiendo que las frecuencias bajas - tonos graves - tengan poca atenuación con la distancia, posibilitando a estos sonidos transmitir información a grandes distancias; por ejemplo, puede emitirse un sonido de baja frecuencia en el Atlántico Sur y ser escuchado en el Atlántico Norte. [14]

En las últimas décadas ha cobrado especial importancia el empleo de las señales acústicas en medios subacuáticos, debido a la necesidad de monitorizar diversos sensores medioambientales, controlar robots sumergidos

con cierto grado de libertad, el uso del sónar, poder investigar la fauna marina... [18]. En este medio, la utilización de cables no es económica o práctica de forma general, de tal forma que las comunicaciones inalámbricas, y más concretamente las acústicas, ha sido la solución más empleada para solventar esta restricción.

La propagación del sonido en entornos marinos no es un proceso que pueda ser descrito de manera sencilla. Esta viene controlada por varios hechos como son la estructura variable de la velocidad del sonido, y la presencia de la superficie del mar y del fondo. La velocidad del sonido en el mar varía como consecuencia de los cambios en temperatura, salinidad y presión. [17] [5]

La superficie marina es, en general, rugosa, por lo que la reflexión del sonido en ella es un problema complejo y cambiante con el tiempo. El fondo del mar se aproxima a un medio formado por una superposición de capas sedimentarias y roca. El sonido submarino puede reflejarse en la interfaz agua-sedimento o puede entrar en el fondo, para emerger hacia la columna de agua, como resultado de la reflexión y refracción en las capas sedimentarias o rocosas.

Las variaciones de los parámetros marinos medioambientales, en el plano horizontal son, en general, mucho más pequeñas que las variaciones en el plano vertical. Con independencia de este hecho, los primeros intentos de predecir la propagación acústica en el mar se hacen bajo el supuesto de que ningún parámetro medioambiental varía con la distancia.

Estos métodos no son adecuados, por imprecisos, en zonas que contienen cambios apreciables, con la distancia: rompientes, ondas internas, dunas en el fondo, montañas submarinas, fondo marino muy rugoso, etc. En tales entornos desarrollar una solución numérica de la ecuación de onda tridimensional, resulta computacionalmente costosa, en términos de tiempo de ejecución. [20] [24]

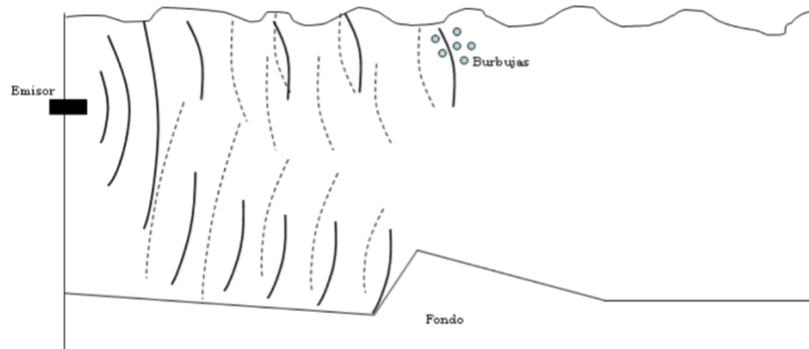


Ilustración 3. Proceso de reverberación debido a la superficie, el fondo y una región con burbujas presente en el agua.[15]

El fondo marino es de importancia crucial en aguas muy poco profundas. La descripción de estos efectos puede hacerse bien a través de tablas que relacionan las pérdidas por reflexión en función del ángulo de incidencia, o bien a través de una descripción completa de las propiedades geoacústicas del fondo. El primer método es más útil a altas frecuencias, pues el sonido que entra en el fondo a esas frecuencias se atenúa rápidamente y no influye en la propagación a través del agua. Por el contrario, a bajas frecuencias el sonido puede volver al agua por procesos de reflexión.

La influencia de las propiedades del fondo cobra relevancia en aguas poco profundas debido a procesos de reflexión que dependen principalmente del tipo de sustrato y su reflectividad. [18]

2.2. Aplicaciones

En la actualidad son variadas las aplicaciones y usos de esta disciplina. Principalmente las aplicaciones de la acústica submarina son de carácter militar o técnico, pero tienen, además, un gran interés para usos industriales. La acústica submarina es un área que permite estudiar el medio marino, desde la fauna existente (estudio de señales bioacústicas de cetáceos) a estudios de impacto ambiental de ruido continuo o impulsivo de origen humano, es por ello por lo que también es una gran competencia del propio interés científico.

Uno de los primeros usos de la acústica submarina fue el sónar, es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua principalmente para navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos. El sónar puede usarse como

medio de localización acústica, funcionando de forma similar al radar, con la diferencia de que en lugar de emitir ondas electromagnéticas emplea impulsos sonoros. De hecho, la localización acústica se usó en aire antes que el GPS, siendo aún de aplicación el SODAR (la exploración vertical aérea con sonar) para la investigación atmosférica. [13]

Se pueden distinguir dos tipos de estos: el pasivo que sólo escucha el sonido generado en el mar, similar a la técnica de ensayos no-destructiva llamada emisión acústica; y el activo, que genera pulsos sonoros y recibe el eco o el rebote producido en los objetos, dando información sobre este último, lo que es equivalente a la técnica del ultrasonido. Si se recibe una señal en distintos micrófonos detectores, es factible realizar la ubicación de la fuente emisora de sonido, por triangulación. Luego, por medio de algoritmos adecuados esta puede ser representada en el monitor de una computadora y observar su posición y dirección de movimiento. [16] [23] Para extraer la información transportada, los sonidos registrados bajo el agua deben ser analizados no sin antes disminuir el ruido que contienen, los cuales pueden ser de diversos tipos: ruido térmico, ruido ambiente, ruido debido al flujo de corriente y movimiento del agua, ruido estructural excitado por la marea y maquinaria y ruido antropogénico, siendo este último debido a las actividades humanas (embarcaciones, instalaciones portuarias, entre otras). Mediante el SONAR también es posible determinar la profundidad del mar mediante el registro sonoro del eco, y para la transmisión de información de barco a barco, y en particular a submarinos. [17]

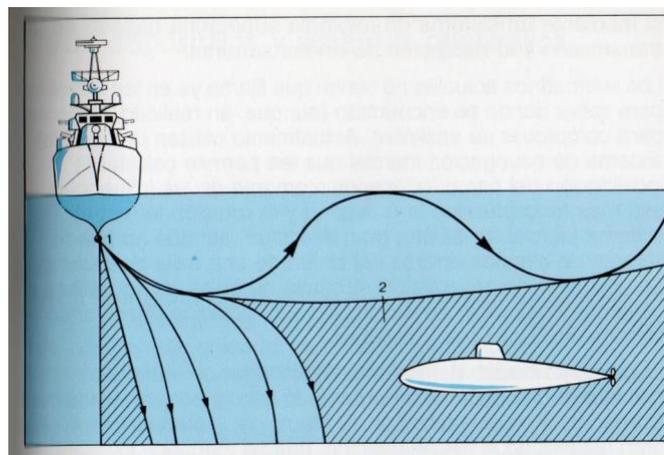


Ilustración 4. Las ondas sonoras pueden llegar a distorsionarse notablemente si encuentran una capa de agua de diferente densidad. En tal caso se pueden crear "áreas sombra" (2) donde el sonar (1) no penetra. [3] [15]

Por otra parte, la acústica submarina puede ser utilizada para la comunicación entre cetáceos, ya que usan las características de propagación del sonido para orientarse e incluso para comunicarse entre ellos. El oído es su sentido más importante. Se sabe que producen al menos dos tipos de sonidos, los que intervienen en su sistema de ecolocación y las vocalizaciones. [25] Es probable que ambos se produzcan como consecuencia del movimiento del aire al entrar y salir de los sacos nasales. Los sonidos de ecolocación funcionan como una especie de sonar biológico, mientras que las vocalizaciones, son las conocidas canciones de las ballenas, las cuales parecen ser un medio de comunicación entre los miembros de la misma especie. [14]

Los océanos de la Tierra cubren más del 70 por ciento de la superficie del planeta; pese a todo, hasta hace poco tiempo, conocíamos menos de sus profundidades que lo que conocíamos de la superficie de la luna. Sin embargo, hasta el siglo XX, no se dispuso de un instrumento análogo para estudiar los océanos de la tierra. Como ejemplo, la luz, que puede recorrer billones de kilómetros por la inmensidad del espacio, no puede adentrarse muy lejos en el mar. [23]

3. Medio de transmisión

En este apartado se describe la propagación de las ondas acústicas en el medio submarino, analizando factores tan importantes como la velocidad de la onda en el medio que determinará su trayectoria. Condiciones del agua como la salinidad o la temperatura serán determinantes para conocer la velocidad y ya tenemos varios modelos para su cálculo que serán descritos posteriormente.

También se analizan las características del canal acústico submarino: el ruido, los efectos debidos al multitrayecto, el desplazamiento en frecuencia y las pérdidas de transmisión producidas por divergencia y absorción.

3.1. El sonido y su propagación

Las ondas sonoras se generan a causa de la propagación de una perturbación mecánica en un medio elástico, como puede ser un fluido y ,en este caso, el

agua. Dicha propagación se produce a una velocidad que varía en función de las características del medio.

Una onda sonora puede considerarse como la energía mecánica transmitida por la fuente desde partícula a partícula, propagada a través del medio a una velocidad igual a la velocidad del sonido en dicho medio. Parte de la energía mecánica de la onda sonora es absorbida por el medio en el que se propaga debido principalmente a rozamiento y a fenómenos resonantes. El sonido en el agua se propaga más rápido y tiene menores pérdidas que en el aire.

Diversos factores influyen en la distancia que el sonido puede viajar bajo el agua. Las partículas de agua de mar pueden reflejar, dispersar y absorber algunas frecuencias de sonido. El agua de mar absorbe 30 veces la cantidad de sonido absorbido por el agua destilada, atenuando su amplitud a ciertas frecuencias. Los sonidos de baja frecuencia son capaces de pasar las pequeñas partículas y viajar mayores distancias sin sufrir, prácticamente, pérdidas por absorción o dispersión. Además, la propagación de las ondas se refractará hacia arriba o hacia abajo en función de los cambios de salinidad, temperatura y presión, que afectarán a la velocidad de la propagación del sonido bajo el agua, variando entre 1450 y 1540 m/s. [21]

Una onda sonora es caracterizada por: la distancia de cada partícula al punto de equilibrio, la velocidad de propagación, la velocidad de la partícula y la presión acústica.

La propagación acústica submarina se caracteriza por cambios importantes dependientes de la frecuencia y la baja velocidad de propagación en comparación a la de propagación electromagnética en la atmósfera. Las pérdidas de transmisión y ruido son los principales factores que determinan el ancho de banda disponible, distancia y relación señal a ruido para el funcionamiento de un sistema de comunicaciones. Además, la baja velocidad de propagación de las ondas acústicas conlleva a la aparición del fenómeno del multirayado o multirayecto que varía en el tiempo e influye en el diseño y procesamiento de la señal, suponiendo limitaciones severas en la realización del sistema. [22]

Las pérdidas de transmisión engloban tres mecanismos de atenuación que afectan a las ondas acústicas submarinas: radiación de energía, absorción y

reflexión del sonido. Mientras que las pérdidas por radiación de energía dependen sólo de la distancia de propagación, las pérdidas por absorción aumentan no sólo con la distancia sino también con la frecuencia, fijando el límite en el ancho de banda disponible.

(La generación de ondas acústicas produce un aumento de la cantidad fija de energía transmitida por la fuente hacia grandes áreas externas a ella. Dicha dispersión espacial de la energía se considera una atenuación geométrica, en la que la energía disminuye en función de r^{-k} , donde r es la distancia y k es el factor de dispersión que describe la geometría de propagación. La radiación para distancias cortas se puede considerar como propagación esférica con $k = 2$, y para distancias largas como propagación cilíndrica con $k = 1$, debido a que las ondas no pueden propagarse indefinidamente en dirección vertical por la existencia de los límites que forman el fondo marino y el interfaz con el aire de la atmósfera. El segundo mecanismo de atenuación son las pérdidas por absorción, causado por la perturbación mecánica producida en el fluido a través del movimiento de las partículas lo que produce una conversión de la energía de la onda propagándose en calor.)[23]

Las ondas sonoras son parcial o totalmente reflejadas en función de la frecuencia, la velocidad del sonido y el tipo de obstáculo encontrado. El ruido observado en los mares y océanos depende en gran medida de la frecuencia y la situación geográfica. Normalmente, en los entornos cercanos a la costa existe mucho más ruido que los océanos profundos debido a las fuentes artificiales de ruido que crea el hombre. A diferencia del ruido artificial, la mayoría de las fuentes naturales de ruido ambiente (turbulencias, oleaje y ruido térmico molecular) puede ser modelada por un espectro continuo y ruido Gaussiano coloreado.

El ruido ambiente sumado a las pérdidas de transmisión dependientes de la frecuencia determina la relación entre la distancia, el ancho de banda y la relación señal a ruido (SNR Signal-to-Noise Ratio) disponibles a la entrada del receptor.

Se pueden clasificar los sistemas de comunicaciones acústicas subacuáticas en base a la distancia como sistemas de largo, medio, y corto alcance. Para sistemas de largo alcance se opera sobre 10-100 km y el ancho de banda está limitado a unos pocos kHz. En los sistemas de medio alcance opera sobre 1-

10 km y presentan un ancho de banda del orden de 10 kHz. En los sistemas de corto alcance por debajo de 100 m, se pueden conseguir más de 100 kHz. Como el ancho de banda está limitado existe la necesidad de analizar diferentes métodos de modulación eficientes en el ancho de banda si se quiere transmitir más de un bps/Hz sobre este tipo de canales acústicos. [24]

En la mayoría de los casos las señales acústicas están sujetas a la propagación mediante un canal subacuático, cuyas propiedades son variantes en el tiempo y están fuertemente ligadas a la localización del transmisor y receptor.

La estructura depende de la configuración del enlace de transmisión, ya sea horizontal o vertical en función de las posiciones del transmisor y receptor. Por otra parte, los enlaces verticales tienen un tiempo de dispersión pequeño pero los enlaces horizontales pueden experimentar un retardo de dispersión mayor. La mayor parte de los canales de largo y medio alcance presentan alta dispersión que origina una degradación severa de las señales de acústicas en la comunicación.

La propagación multitrayecto está bastante relacionada con la profundidad de los océanos: En el caso de aguas profundas se forman multicaminos debido a la curvatura de los rayos que tienden a zonas donde se encuentra la velocidad de propagación menor (a la línea que sigue el rayo de la onda acústica se le denomina eje del canal sonoro profundo); y en el caso de aguas someras se produce debido a las reflexiones en la superficie y fondo del mar junto con un posible camino directo. En canales de aguas profundas, la refracción provocada por el gradiente vertical de la velocidad de propagación en la columna de agua permite la aparición de zonas de sombra en las que la señal llega con baja energía, pudiéndose perder la conexión con el receptor; mientras que en aguas someras estas zonas de sombra son casi inexistentes. [20][23]

El diseño de los sistemas de comunicaciones subacuáticas se realiza mediante el uso de modelos de propagación para predecir la estructura multicamino. La teoría de rayos y la teoría de modos normales facilitan las bases para tales modelos de propagación.

Las duras condiciones del canal subacuático crece con el grado de movilidad de todos los elementos presentes en el sistema de comunicaciones, por lo que se ocasiona un desvanecimiento multitrayecto rápido.

Resumiendo, la señal acústica se propaga en un entorno muy hostil en el que es muy complicado conseguir una modulación espectralmente eficiente debido a los diferentes problemas que aparecen en el canal submarino. Los principales desafíos que dificultan el desarrollo y funcionamiento de los sistemas de acústica submarinas son:

- El ancho de banda está bastante limitado.
- Ruido ambiente.
- Los retardos de propagación son elevados. La velocidad de transmisión de las ondas acústicas en agua salada es alrededor de 1500 m/s, por lo que el retardo de propagación en el canal subacuático es muy significativo pues tiene profundas implicaciones en la sincronización del tiempo.
- La respuesta al impulso del canal tiene variaciones temporales y espaciales. Las características del canal varían con el tiempo y dependen mucho de la localización del transmisor y receptor. La naturaleza fluctuante del canal causa que las señales recibidas sean fácilmente distorsionadas. Existen dos tipos de caminos de propagación: los caminos determinísticos causados tanto por la reflexión de las ondas en los límites como la superficie y el fondo del mar, como por la curvatura de los rayos acústicos causada por la variación del índice de refracción del agua con la profundidad del mar; y los caminos aleatorios causados principalmente por las olas en la superficie, que contribuye a la mayor parte de la variación temporal. La señal sufrirá con frecuencia dispersión debido a la propagación multicamino. [20]

3.2. Características del sonido

3.2.1. Nivel de presión

La impresión de nivel acústico del oído humano viene determinada por la intensidad (densidad de flujo de energía). Como en la mayoría de los casos de

interés práctico ésta es proporcional al cuadrado de la presión ($I=p^2/z$, siendo z la impedancia del medio de transmisión), el nivel de presión sonora en decibelios se define como:

$$SPL(dB) = 10 \log \frac{P^2}{P_{ref}^2} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (2)$$

Para una onda senoidal de presión cuya amplitud sea P_{max} , la expresión en dB del valor de pico es la siguiente:

$$p_{0-p}L(dB) = 20 \log \frac{p_{max}}{p_{ref}} \quad (3)$$

La intensidad media es:

$$\begin{aligned} IL(dB) &= 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \\ &= 10 \log \frac{P_{RMS}^2}{P_{ref}^2} \\ &= 20 \log \frac{P_{RMS}}{P_{ref}} = P_{RMS}L(dB) \\ &= 20 \log \frac{P_{max}/\sqrt{2}}{P_{ref}} \\ &= P_{0-p}L(dB) - 20 \log \sqrt{2} = P_{0-p}L(dB) - 3 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4)$$

Los valores de referencia para la expresión en dB de las diferentes magnitudes acústicas son combinaciones de las unidades del Sistema Internacional de Unidades (metro, segundo, julio, watio), a excepción de la presión, para la que se utiliza como referencia un submúltiplo de la unidad: el micropascal (μPa).

El μPa se utiliza también en todas las combinaciones de valores de referencia en las que intervenga la presión. Los valores de referencia de la presión, intensidad y potencia son diferentes para el aire que para el mar. El valor de referencia de la presión sonora eficaz (RMS) en el aire, para el cálculo en dB es $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ($20 \mu\text{Pa}$). Este valor es aproximadamente el umbral de

audición humana a 1 kHz. Las unidades resultantes son dB de presión sonora referidos a 20 μPa :

$$SPL = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB re } 20\mu\text{Pa} \quad (5)$$

En el mar, para la presión sonora se utiliza la referencia de 1 μPa , y los niveles de presión sonora se miden en dB re 1 μPa . Al pasar del aire al mar, el cambio de presión de referencia de 20 μPa a 1 μPa corresponde a 26 dB ($20 \cdot \log 20 \approx 26$ dB).

Con la intensidad sonora, IL (Nivel de Intensidad), el valor de referencia es $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Las unidades resultantes son dB de nivel de intensidad sonora:

$$IL = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (6)$$

Si se opera con potencia acústica, el valor de referencia es $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$. Las unidades resultantes son dB de nivel de potencia acústica:

$$WL = 10 \cdot \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (7)$$

Por otro lado, dado que la impedancia del medio (z) es distinta en el mar ($1,5 \cdot 10^6$ Rayls) que en el aire (415 Rayls), y que la relación entre la intensidad y la presión en campo libre viene dada por la expresión $I = P^2 / z$, una misma presión ejercida en el mar provoca una intensidad 36 dB mayor que en el aire ($10 \cdot \log(1,5 \cdot 10^6 / 415) \approx 36$ dB).

Por tanto, como consecuencia de los cambios en la presión de referencia y en la impedancia del medio, una presión p provocará una intensidad I (dB) en el aire y una intensidad $I + 62$ dB en el mar. [23]

Resumiendo, hay dos razones principales por las que no se pueden transformar directamente los niveles sonoros en el mar y en el aire.

- La primera se debe a que las variaciones de la densidad y velocidad del sonido en cada medio provocan cambios en la transmisión de la presión acústica. Para corregir estos efectos hay que sumar 36 dB al nivel medido en aire.
- La segunda razón viene dada por los distintos niveles de referencia utilizados para calcular el nivel de las señales en agua (re. 1 μPa) y en aire (re. 20 μPa), que se traduce a 26 dB. Por tanto, para expresar un nivel medido en el aire a su equivalente matemático en el agua deben sumarse 62 dB. Sin embargo, el gran desconocimiento existente, sobre las adaptaciones de la fisiología acústica de la fauna marina para recibir el sonido, hace que lo más prudente sea no realizar extrapolaciones sobre los impactos que los mismos niveles de sonido podrían tener en mar y aire. [28]

3.2.2. Velocidad del sonido

Las características detalladas del océano y su entorno que afectan a la transmisión del sonido son muy complejas. La velocidad del sonido es función de la temperatura, profundidad y salinidad.

La temperatura es función de la profundidad, tiempo, localización y condiciones meteorológicas. La superficie del océano varía de un receptor liso a una superficie irregular que dispersa el sonido de un modo aleatorio. El fondo oceánico tiene gran variedad de materiales, pendientes e irregularidades, todas las cuales afectan al sonido.

El resultado de todas ellas produce la transmisión acústica final. No obstante, es posible reconocer patrones predecibles relacionados con las condiciones ambientales y localizaciones geográficas. De este modo, perfiles típicos de la velocidad del sonido suelen estar disponibles para una localización geográfica y una estación determinada. Las pérdidas acústicas de contorno, derivadas de consideraciones teóricas y empíricas, cubren las diferentes velocidades de vientos, características del fondo, agitación de la superficie y frecuencias. [21]

De forma rigurosa, la velocidad del sonido se obtiene a partir de la ecuación de ondas lineal, y su valor es el que aparece en la ecuación

$$c^2 = \gamma \frac{\mathcal{B}_T}{\rho_0} \quad (8)$$

Donde c es la velocidad del sonido en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, γ es el índice adiabático, \mathcal{B}_T es el módulo de compresibilidad isotérmico y ρ_0 la densidad de equilibrio. A su vez, estas tres magnitudes son función de la temperatura y de la presión del agua.

El medio subacuático más utilizado en la propagación de las ondas acústicas es el océano (o los distintos mares). El agua de mar es distinta de la destilada en lo que respecta a las variables que influyen en la velocidad del sonido, introduciendo otro factor más: la salinidad. A lo largo de las últimas décadas, han surgido diferentes ecuaciones para expresar la velocidad del sonido en medios marinos, donde las más importantes son las ecuaciones de Del Grosso y de Chen y Millero. Esta última ecuación (9) fue reconocida por la UNESCO como el algoritmo estándar para calcular la velocidad del sonido para medios subacuáticos [16].

La ecuación de Del Grosso data originalmente de 1974 y se expresa, en su forma corregida posteriormente, según la ecuación:

$$c(S, T, P) = 1402.392 + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (9)$$

Los coeficientes ΔC_i engloban a su vez a otros (un total de 18) que pueden ser función de la temperatura (T), presión (P) y salinidad (S). Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 30°C , salinidades entre 30‰ y 40‰, y presiones entre $0 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ y $100 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$.

La ecuación (10) de Chen y Millero data por su parte de 1977, y en su forma corregida posteriormente se expresa según la ecuación:

$$c(S, T, P) = C_W(T, P) + A(T, P) \cdot S + B(T, P) \cdot S^{\frac{3}{2}} + D(T, P) \cdot S^2 \quad (10)$$

donde al igual que en el caso anterior, los coeficientes que aparecen engloban a su vez a otros (un total de 42), que pueden depender de la temperatura (T),

presión (P) y salinidad (S) [16]. Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 40°C, salinidades entre 0‰ y 40‰ y una presión entre 0 y 1000 bar. No existe una diferencia apreciable entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones en los rangos de validez donde se solapan. [27]

Una vez que se obtiene un valor para la velocidad del sonido en función de la temperatura, la presión y la salinidad, se puede estudiar cómo varía esta velocidad respecto a la profundidad, para obtener así el perfil de la velocidad del sonido. Para ello, hay que conocer cómo varían la temperatura, la salinidad y la presión respecto a la profundidad.

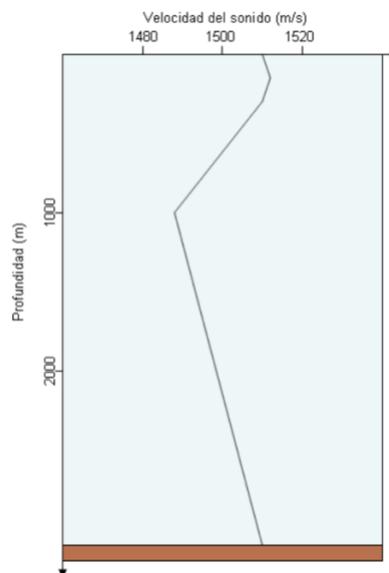


Ilustración 5. Perfil típico para latitudes medias. Fuente : Jesús Ureña

Una vez que se conoce la forma del perfil de la velocidad del sonido, se puede determinar cómo se va a propagar la señal acústica por el medio subacuático. Debido al principio de Huygens y dada la forma del perfil de la velocidad del sonido, se forman zonas donde las ondas que surgen de los frentes de onda se propagarán a velocidades distintas en función de la profundidad a la que se encuentren dichos frentes. El efecto neto es la curvatura de la onda acústica hacia la región donde la velocidad del sonido es menor. La forma del perfil de la velocidad del sonido y este efecto de la curvatura de las ondas acústicas hacia las zonas donde esta velocidad es menor y es clave para la aparición de distintos tipos de propagación. [12]

4. Métodos números de simulación aplicados a la estrategia marina

Como bien sabemos, un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos que se usan para representar las características de un ambiente dado, en nuestro caso, lo haremos en la acústica submarina.

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos de tal forma que puedan resolverse usando operaciones aritméticas. Nos vuelven aptos para entender esquemas numéricos a fin de resolver problemas matemáticos, de ingeniería y científicos en un ordenador, reducir esquemas numéricos básicos, escribir programas y resolverlos y usar correctamente el software existente para dichos métodos. Con ellos ampliamos la pericia matemática y la comprensión de los principios científicos básicos.

El análisis numérico trata de diseñar métodos para “aproximar” de una manera eficiente las soluciones de problemas expresados matemáticamente. El objetivo principal del análisis numérico es encontrar soluciones “aproximadas” a problemas complejos utilizando sólo las operaciones más simples de la aritmética. Se requiere de una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas que producen la aproximación al problema matemático. [25]

Existen diversos modelos matemáticos que estudian la propagación acústica en medios subacuáticos, destacando los modelos de trazado de rayos, modos normales, ecuación parabólica e integración espectral. Sin embargo, la configuración de estos modelos matemáticos requiere de diversos parámetros cuyo valor no siempre es conocido con exactitud, lo que puede conducir a resultados poco fiables.

Como consecuencia de este problema, han surgido a lo largo de las últimas décadas diversos modelos semi-empíricos para estudiar la propagación acústica en medios subacuáticos, distinguiendo distintos tipos de propagación. Como la inmensa mayoría de estudios se ha realizado sobre el mar, se hablará por defecto del medio marino, pero los resultados son aplicables a otros tipos de medios subacuáticos con las consideraciones oportunas. [28] En nuestro

caso, centraremos nuestra atención en dos de los grandes modelos matemáticos como son el trazado de rayos y la ecuación de onda parabólica que presentaremos con detalle a continuación.

4.1. Teoría de rayos

Siguiendo la analogía de la óptica, la ecuación de onda se puede resolver en el límite de alta frecuencia integrando la ley de Snell y la ecuación eikonal asociada. Esta solución de trazado de rayos es muy intuitiva porque las rutas de sonido se pueden rastrear y mostrar la ruta de cada rayo. El trazado de rayos es muy eficiente. Una vez que se calculan los rayos, los niveles del campo acústico se calculan sumando los rayos cerca del receptor.

Los rayos a menudo se extienden en tamaño utilizando la aproximación del haz gaussiano. La interacción de los rayos con el fondo marino se logra utilizando un coeficiente de reflexión sin penetración en el fondo marino. La teoría de rayos tiene una precisión limitada a bajas frecuencias (típicamente por debajo de alrededor de 200 Hz) donde la difracción es significativa y donde ocurre la penetración del fondo marino. [26]

En cuanto a las ventajas y desventajas de esta, podemos decir que la teoría de rayos funciona de manera incorrecta cuando hay conductos de superficie y otros campos de velocidad de sonido con discontinuidades y superficies rugosas. La teoría maneja entornos arbitrarios dependientes del rango, es mejor en aguas profundas y es adecuada a frecuencias más altas.

Para explicar con exactitud la teoría de rayos tenemos que profundizar en las matemáticas para poder ponernos en situación de como actúan los rayos y que tipo de trayectoria siguen. Lo primero que tenemos que considerar es que una onda plana se mueve de forma perpendicular al frente de onda, (figura 5) donde indica la dirección en la que fluye la energía acústica(sonido). Por convención, la intensidad es inversamente proporcional a la distancia entre los rayos. Luego, para una onda plana, los rayos deben representarse equidistantemente.

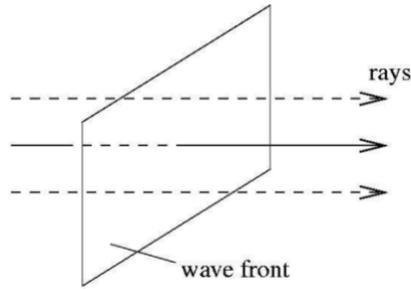


Ilustración 6. Movimiento perpendicular de onda plana. [19]

Luego consideramos una onda esférica debido a una fuente puntual en un medio homogéneo (figura 6). Los frentes de olas son esferas. Perpendicular a los frentes de onda, se han dibujado unos pocos rayos formando el llamado diagrama de rayos. El número de rayos por unidad de área es proporcional a la intensidad del sonido. Por lo tanto, a una distancia r de la fuente puntual de intensidad es inversamente proporcional al área de una esfera con radio r , es decir, $1 / r$.

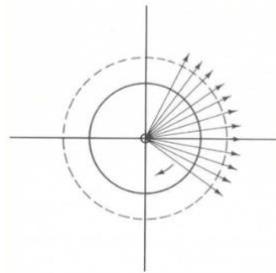


Ilustración 7. Medio homogéneo. [19]

Ahora considere que el medio no es homogéneo, por ejemplo, la velocidad del sonido disminuye linealmente al aumentar la profundidad. La onda de propagación ahora cambia con la dirección, lo que da como resultado frentes de onda no esféricos (figura 7). Los rayos de sonido, aún perpendiculares a los frentes de onda, ahora siguen caminos curvos con un radio de curvatura variable. Esto se llama "refracción" de los rayos de sonido. Aún así, la densidad local de los rayos de sonido es la medida de la intensidad del sonido local.

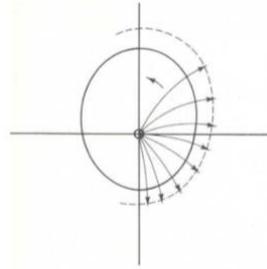


Ilustración 8. Frentes de onda no esféricos. [19]

La refracción de un rayo de sonido en un medio (el océano) donde la velocidad del sonido varía linealmente con la profundidad z ;

$$c(z) = c_0 + g z \quad (11)$$

Con c_0 la velocidad del sonido a una profundidad de referencia (tomaremos $z = 0$ m) y g la velocidad del sonido -1 gradiente (unidad: s).

La ley de Snell se aplica a lo largo del rayo de sonido:

$$\frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = \frac{\cos \theta_0}{c_0} = \frac{1}{c_0} \quad (12)$$

Diferenciamos las ecuaciones con respecto a la profundidad z , por lo tanto:

$$dz = \frac{-c_0 \sin \theta}{g} d\theta \quad (13)$$

Al derivar obtenemos:

$$\sin \theta = \frac{dz}{ds} = \frac{dz}{R d\theta} \quad (14)$$

y comparando las dos últimas ecuaciones (13)(14) obtenemos;

$$R = -\frac{c_0}{g} = -\frac{c(z)}{g \cos \theta(z)} \quad (15)$$

cuando $g < 0$ entonces $R > 0$, es decir, la refracción descendente del rayo;

cuando $g > 0$, entonces $R < 0$, es decir, refracción hacia arriba del rayo;

Como hemos comentado anteriormente, la velocidad del sonido en el océano varía con la profundidad debido a cambios en la densidad y en la temperatura del agua, alcanzando un mínimo local a una profundidad de entre 800 y 1000 metros. Este mínimo local, llamado el canal SOFAR, actúa como una guía de ondas, debido a que el sonido tiende a orientarse hacia este canal. El trazado de las ondas de sonido se suele calcular a través del océano hasta distancias muy grandes, incorporando los efectos del canal SOFAR, así como de reflexiones y refracciones de la superficie y del fondo del océano. A partir de esto, la ubicación de las señales de alta y de baja intensidad puede ser calculada, lo que resulta de gran utilidad en los campos de la acústica oceánica, de la comunicación acústica submarina, y de la termometría acústica.

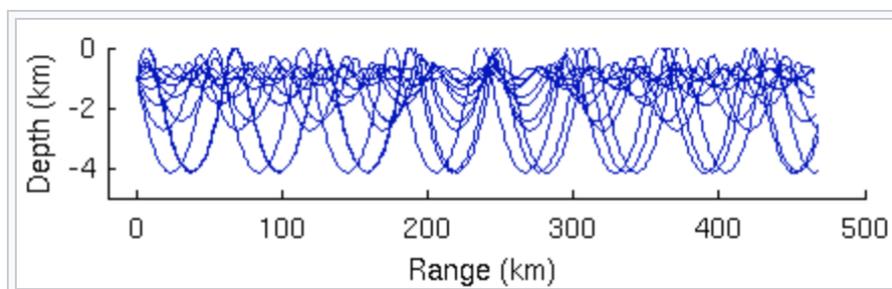


Ilustración 9. El trazado de rayos utilizado para localizar frentes de onda acústicos propagándose a través de la densidad variable del océano. El camino puede ser observado oscilando en el canal SOFAR.

Como conclusión podemos destacar que las ventajas del trazado de rayos son:

- La direccionalidad de la fuente y el receptor se puede acomodar con bastante facilidad, mediante la introducción de factores de ponderación del ángulo de lanzamiento y llegada apropiados.

- Los rayos pueden rastrearse a través de perfiles de velocidad de sonido dependientes del rango y sobre batimetría complicada. Por el contrario, los cálculos deben realizarse a todas las distancias al receptor. Si bien se requieren solo unos pocos rayos para determinar el campo de sonido en un receptor distante en océanos profundos, se necesitan muchos rayos en aguas poco profundas.

Quizás la desventaja más pertinente, sin embargo, es que los efectos de las olas como la difracción y la cáustica no pueden manejarse fácilmente de manera adecuada mediante el trazado de rayos, lo que limita la utilidad de este enfoque para la investigación de las interacciones del fondo marino y para la propagación de baja frecuencia:

- La difracción de onda permite que el sonido se extienda a la zona de sombra cerca de la región límite de la zona, mientras que el trazado de rayos predice que no hay sonido en la zona de sombra, lo que resulta en un contraste muy agudo a cada lado de la región límite.
- En un cáustico, las amplitudes se convierten en singularidades debido a los rayos convergentes que resultan en una región de alta presión.

4.2 Integración de la ecuación de onda parabólica.

Casi todo el modelado acústico implica el cálculo de la propagación del campo desde una fuente a un receptor distante. En este problema, la propagación es unidireccional. La separación de la ecuación de onda en soluciones entrantes y salientes conduce a la ecuación parabólica. Sin tener en cuenta la energía entrante (energía dispersada hacia atrás), el campo acústico se puede calcular utilizando un algoritmo de marcha denominado modelo de ecuación parabólica (PE).

Hay varios modelos disponibles en cuanto a la ecuación de onda parabólica: dos de ellos son la solución Fast Fourier Transform de dos pasos desarrollada por Tappert [1977] y la solución de expansión Padé desarrollada por Collins [1993].

El PE es adecuada para entornos que dependen del alcance, perfiles de velocidad de sonido discontinuos y se usa comúnmente en aguas poco profundas y profundas. Los requisitos computacionales de PE aumentan con la frecuencia al cuadrado (o $f \cdot \log(f)$ para el PE de Fourier) y, por lo tanto, el PE se usa generalmente en frecuencias inferiores a 1 kHz. El enfoque de Transformación rápida de Fourier de dos pasos no maneja fácilmente las discontinuidades de densidad y, por lo tanto, no es el modelo de elección en aguas poco profundas.

El campo de sonido subacuático se puede describir mediante la ecuación de Helmholtz:

$$[\nabla^2 + k(\mathbf{r})^2]\phi(\mathbf{r}, f) = 0 \quad (16)$$

donde la solución $\phi(\mathbf{r}, f)$ es una función del vector de posición \mathbf{r} y la frecuencia f . Es a través de esta fórmula la que utilizaremos para explicar los dos modelos de propagación que hemos comentado antes.

En la ecuación (16), y suponiendo que $u(r, z)$ depende débilmente de r , de modo que u_{rr} es insignificante. El resultado obtenido es la ecuación de onda parabólica:

$$u_r = \{ik_0[n^2(r, z) - 1]/2\}u + (i/2k_0)u_{zz} \quad (17)$$

La primera condición para la ecuación de onda parabólica :

$$u_1(r, z_B) = u_2(r, z_B)$$

Tomando derivadas parciales de ambos lados de la ecuación, con respecto a z y sustituyendo los resultados en la ecuación, obtenemos la segunda condición de interfaz para la ecuación de onda parabólica:

$$\rho_2 \left. \frac{\partial u_1}{\partial z} \right|_{z_B} = \rho_1 \left. \frac{\partial u_2}{\partial z} \right|_{z_B}$$

El problema de propagación se convierte en un problema de condición inicial en el que el campo de sonido propagado se puede calcular a partir de la ubicación de origen, donde se conoce el valor del campo, haciendo avanzar la solución paso a paso a la distancia requerida.

Los modelos de ecuaciones parabólicas han adquirido popularidad entre la comunidad de acústica submarina, no solo porque se han hecho ampliamente disponibles, sino también porque calculan el campo en toda la columna de agua sin esfuerzo adicional y pueden manejar entornos dependientes del rango, en un rango de profundidades de agua. Además, también se pueden incluir condiciones de contorno elásticas, sin embargo, esto puede introducir algunas restricciones computacionales. Algunos de los modelos PE también pueden manejar la propagación del sonido con ángulos de rayos de hasta 90° . Sin embargo, el uso de modelos de PE generalmente se limita a frecuencias más bajas debido al aumento en el esfuerzo de cálculo a frecuencias más altas. [22]

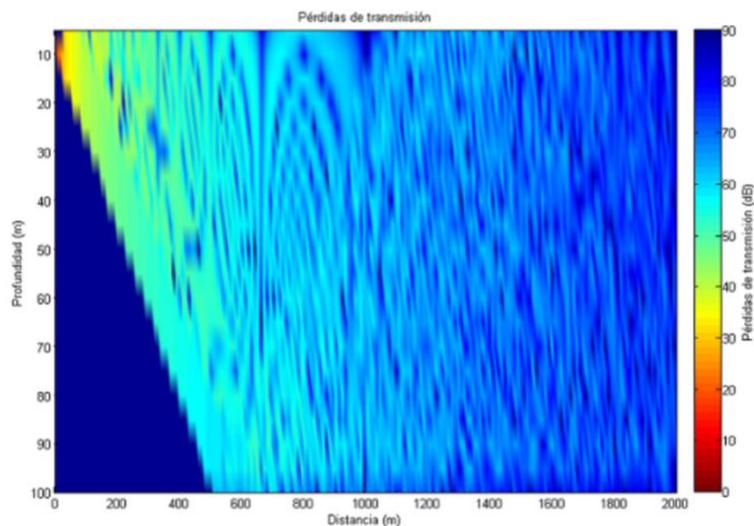


Ilustración 10. Pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad, para el entorno de aguas poco profundas. [17]

5. Procedimiento y metodología

El procedimiento que se ha seguido a la hora de desarrollar este proyecto ha sido el estudio de las dos técnicas de propagación, como son la teoría de rayos y la ecuación de onda parabólica.

Dentro de los modelos que existen para abordar la propagación, uno que suele dar buen resultado para frecuencias medias y profundidades altas es el que aplica la teoría de rayos. La teoría de rayos tiene como ventaja que a medida que aumentamos la frecuencia el tiempo de simulación no se incrementa, cosa que sucedería con otros métodos. El código que hemos utilizado para propagar y necesario para poder después realizar las simulaciones se llama Bellhop.

- Simulación de rayos (Bellhop).

Se entiende por simulación de rayos a la simulación realizada por Bellhop, que tiene como objetivo el estudio del canal entre: en una ubicación concreta con un determinado perfil de velocidad y profundidad del fondo marino. [24] [25]

Lo primero que es necesario parametrizar es la ubicación del emisor y receptor, para ello se utilizan dos coordenadas, profundidad y rango o distancia.

Se permite la opción de emplear varias fuentes o receptores, algo habitual cuando se emplean arrays de transductores. Una vez parametrizado el número de emisores, receptores y sus posiciones, es necesario configurar la apertura con la que emite la fuente.

Por otro lado, es necesario fijar el número de rayos que se quieren trazar. Resulta importante tener en cuenta que un número muy elevado de rayos puede tardar mucho tiempo en procesarse, por lo que, para pruebas, este parámetro puede fijarse a cero, lo que hace que el programa estime el número de rayos oportunos.

Por último y lo más importante hay que considerar un perfil de velocidad del sonido en la columna de agua.

Para estas simulaciones hemos instruido las siguientes características que se nombran a continuación:

- La profundidad de la fuente utilizada es de 250 metros.
- La profundidad del fondo marino es de 1000 metros.
- El rango de simulación abarcará 10 kilómetros.

En cuanto a las frecuencias escogidas para realizar las distintas simulaciones se ha tenido en cuenta las directrices de la MSFD (Marine Strategy Framework Directive). [27]

El sonido antropogénico crónico de baja frecuencia puede estar afectando negativamente la vida marina. La MSFD (Marine Strategy Framework Directive) incluye un indicador específico centrado en este ruido. Este indicador es el nivel de sonido promedio anual en bandas de tercera octava con frecuencias centrales a 63Hz y 125Hz. [28]

Por tanto, utilizaremos las frecuencias de 63 Hz y 125 Hz ya que son las que se utilizan en la evaluación de ruido contiguo. A parte de estas frecuencias también hemos simulado con frecuencias superiores como 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz, frecuencias superiores a las expuestas por la MSFD, para poder estudiar la dependencia de la convergencia de los resultados entre las distintas simulaciones en función de esta.

Bellhop está diseñado para realizar un trazado de rayos acústicos bidimensional para un perfil de velocidad de sonido dado $c(z)$ o un campo de velocidad de sonido dado $c(r, z)$, en guías de ondas submarinas con límites de absorción planos o variables. Las opciones de salida incluyen coordenadas de rayos, tiempo de viaje, amplitud, rayos propios, presión acústica o pérdida de transmisión (ya sea coherente, incoherente o semi-coherente).

El flujo de trabajo se resume en los siguientes pasos:

- Introducir las distintas posiciones de fuente.
- Cargar la batimetría.
- Establecer las frecuencias de cálculo (octavas o tercios de octava) y métodos de resolución (ecuación parabólica, trazado de rayos...).
- Editar fuentes de ruido: directividad, fijas o en movimiento...
- Seleccionar el perfil de velocidad del sonido, profundidad, dirección de las corrientes, temperatura y salinidad.
- Configurar propiedades del suelo marino.

Para mostrar el perfil de velocidad del sonido, utilizamos la función de Matlab "plotssp.m" en "Acoustics Toolbox". La manera de mostrar gráficamente los resultados ha sido mediante el programa MATLAB, en el cual extrajimos las diferentes gráficas que aparecen en el apartado Resultados. [24][25]

En cuanto a las simulaciones que hemos realizado, han sido 4, con diferentes tipos de suelo y de velocidad para poder estudiar y analizar como actúan en consecuencia a la variabilidad de las distintas frecuencias nombradas anteriormente.

Para la velocidad, hemos optado por 2 tipos, velocidad constante, la cual permanecerá invariable en los procesos a lo largo del tiempo (1536 m/s), y velocidad gradiente, la cual variará en función de la distancia (Ilustración 16). Para el tipo de fondo también hemos variado entre fondo plano y fondo con forma de escalón y fondo con batimetría real, para poder estudiar a su vez, las distintas formas de comportamiento no solo dependiendo de la velocidad.

Para estas simulaciones también hemos tenido que analizar las diferentes aperturas de la fuente, para analizar los diferentes comportamientos y poder diferenciar a través de estas, si es una fuente omnidireccional o por el contrario se aproxima a una cardioide.

6. Resultados

En este apartado presentaremos los resultados en formato de gráficas comparativas, de los datos obtenidos en este estudio. Estos resultados mostrarán la evaluación de los dos métodos de propagación dependiendo de la frecuencia utilizada, el tipo de velocidad y el tipo de fondo. Destacaremos especialmente las variables que han influido significativamente a la hora de llegar a las conclusiones del proyecto, ofreciendo las posibles razones que han podido dar lugar a dichos resultados.

El estudio se ha realizado mediante 3 aperturas de fuente distintas, en el caso de la simulación PE (ecuación de onda parabólica), con la finalidad de poder tener una comparación correcta en la que se pueda mostrar la apertura de $\pm 20^\circ$ utilizada en el programa Bellhop del que ya hemos presentados las distintas características.

Para ello hemos contado con las graficas de las batimetrías en el que mostraremos la medición de las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar. Su medición implica la obtención de datos con los valores de la profundidad y la posición de cada uno de los puntos muestreado. Estos puntos de posición, al igual que ocurre con la altimetría, están formados por coordenadas de puntos X,Y,Z.

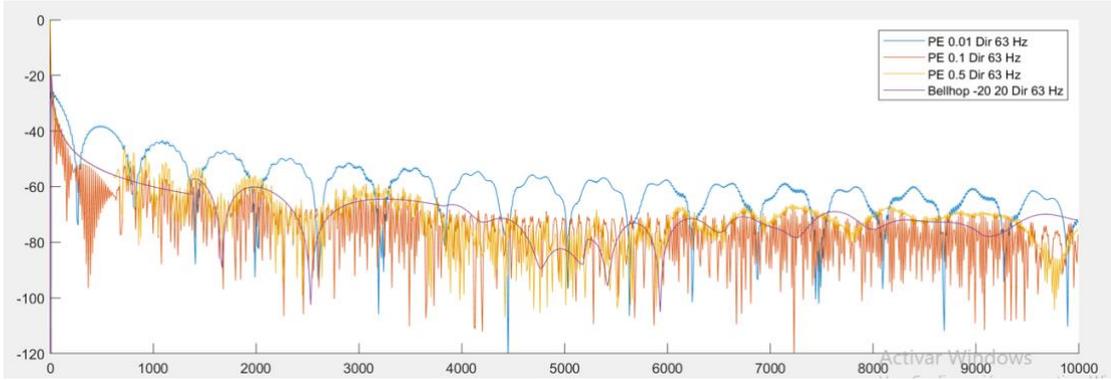
6.1 Velocidad constante y fondo plano

El primer apartado que encontramos en los resultados se ha realizado con la velocidad de propagación constante (1536 m/s) , y mediante un fondo plano (considerando la reflexión de fondo y superficie y que ambas interfaces poseen una geometría plana). Estas primeras características se pueden considerar un modelo básico a la hora de realizar este tipo de estudio.

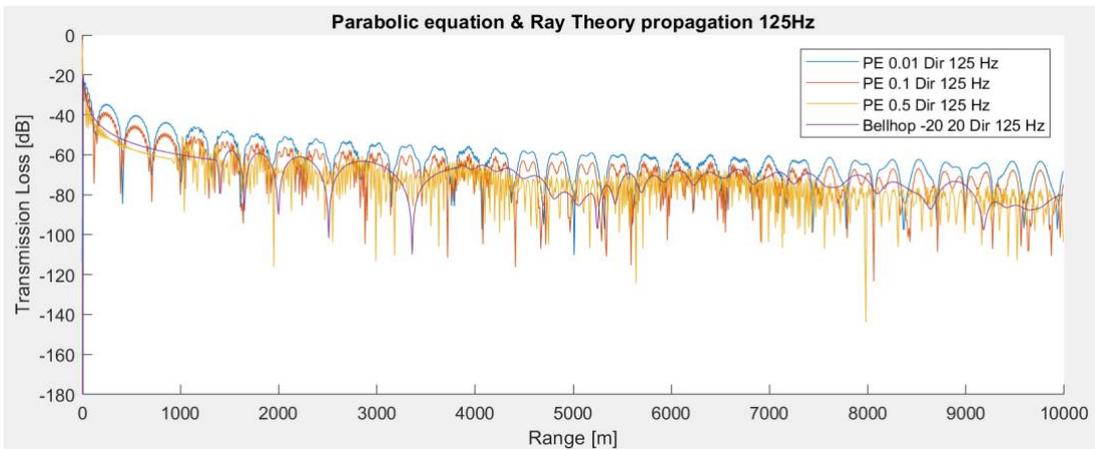
En este apartado se muestran los resultados obtenidos considerando las dos técnicas de propagación, Bellhop y PE, considerando las simulaciones de PE de diferentes aperturas de la fuente Gaussiana (0.01, 0.1, 0.5).

Como podemos observar en la Ilustración 13, el resultado que peor converge corresponde a la menor apertura de la fuente gaussiana (0.01) respecto a los resultados que ofrece el modelo de rayos. Esto se debe principalmente a la diferencia en la apertura de la fuente de un modelo respecto del otro. En contraposición, a medida que se incrementa la anchura de la fuente gaussiana, los resultados convergen con una mayor precisión.

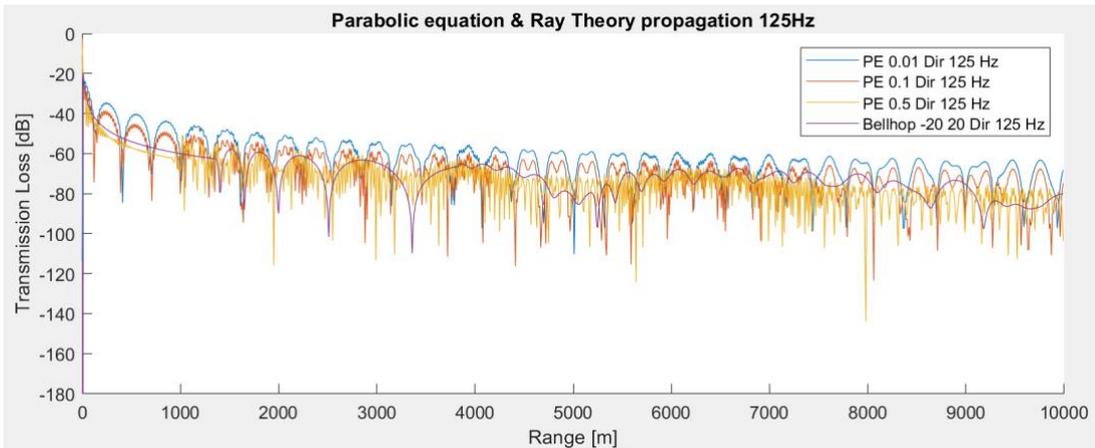
Respecto a la variación de frecuencia, se observa que a medida que esta se incrementa, ambos métodos ofrecen resultados con menos divergencia, como apunta la teoría de modelos de propagación.



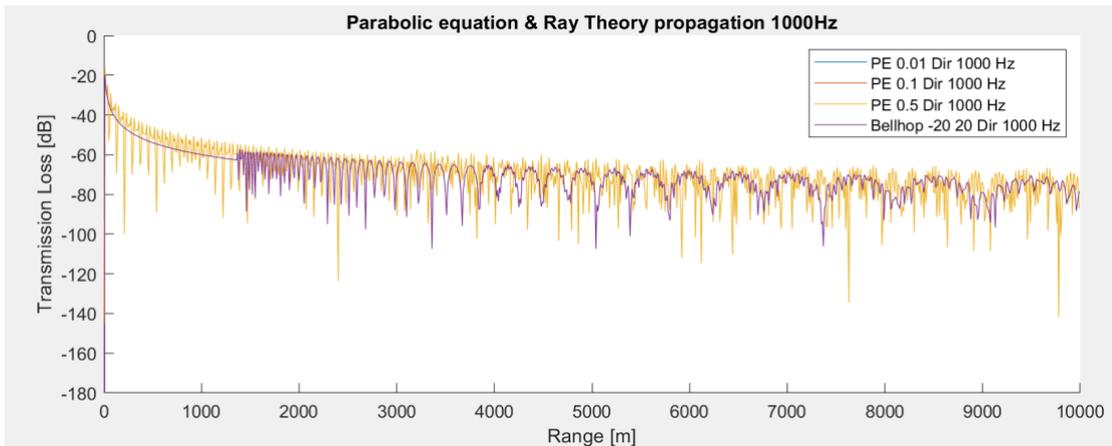
Gráfica 1. Velocidad constante y fondo plano (63 Hz)



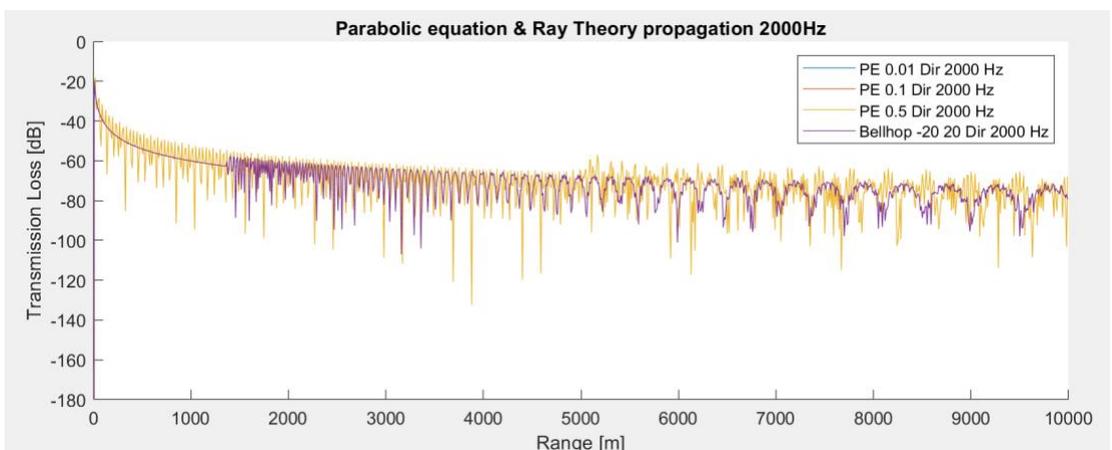
Gráfica 2. Velocidad constante y fondo plano (125 Hz)



Gráfica 3. Velocidad constante y fondo plano (250 Hz)



Gráfica 4. Velocidad constante y fondo plano (1000 Hz)

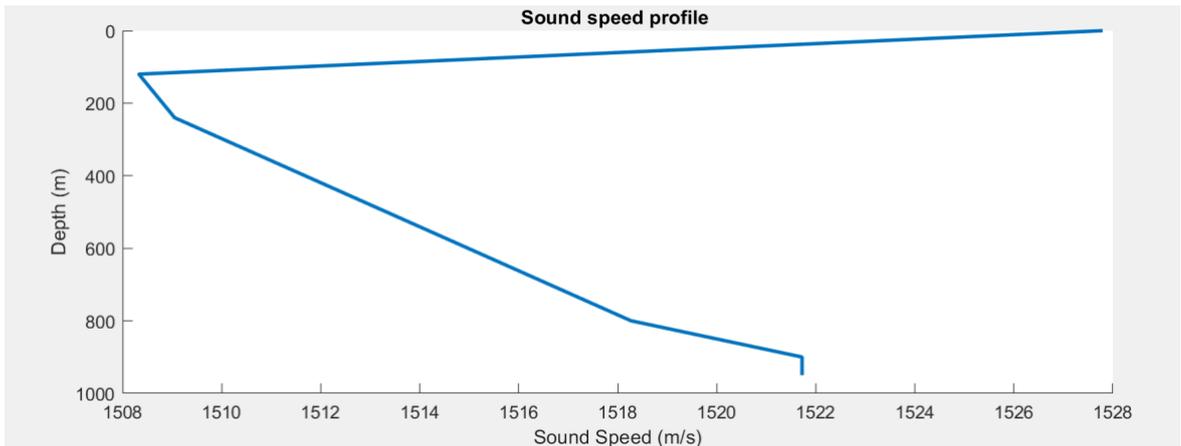


Gráfica 5. Velocidad constante y fondo plano (2000 Hz)

6.2 Velocidad variable y fondo plano

Esta segunda variación, se ha realizado con la velocidad de propagación gradiente, variante entre 1508 a 1528 m/s, como podemos observar en la Ilustración 16, y mediante un fondo plano (considerando las mismas condiciones que en el apartado 6.1). Se ha variado el perfil de velocidad manteniendo el fondo plano, para observar la influencia en los resultados al disponer de un medio con un gradiente en la velocidad del sonido.

También se incluye la gráfica del perfil de velocidad variable, en el que manifestaremos como varía la velocidad dependiendo de la profundidad del mar, desde los 0 metros hasta los 2000m, con una notable apreciación cerca de los 100 metros y una velocidad constante a partir de los 900 metros.



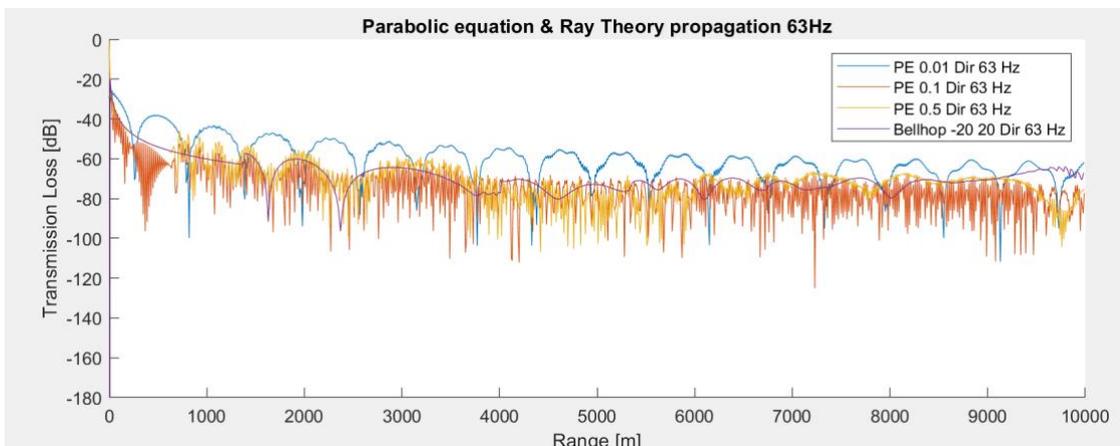
Gráfica 6. Perfil de velocidad variable

Se muestran los resultados obtenidos considerando las dos técnicas de propagación Bellhop y PE, considerando las simulaciones de PE diferentes aperturas de la fuente Gaussiana (0.01, 0.1, 0.5).

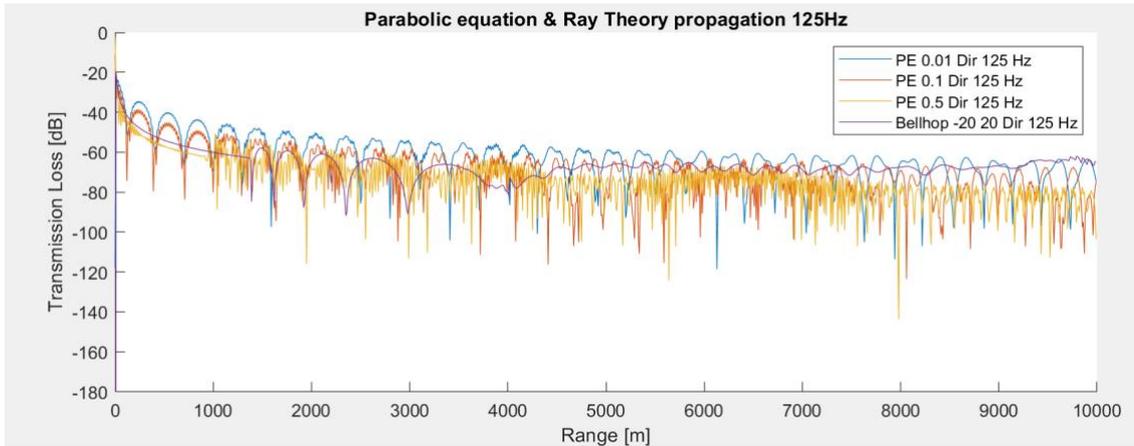
Como podemos observar, en cuanto a la frecuencia significativa de 63 Hz, la menor apertura de la fuente gaussiana es el resultado que peor converge respecto a los resultados que ofrece el modelo de rayos.

En contraposición, a medida que se incrementa la anchura de la fuente gaussiana, los resultados convergen con una mayor precisión, incluyendo el modelo de Bellhop, en el cual se observa en la Ilustración 21 que en la mayor frecuencia (2000 Hz) acaba convergiendo completamente.

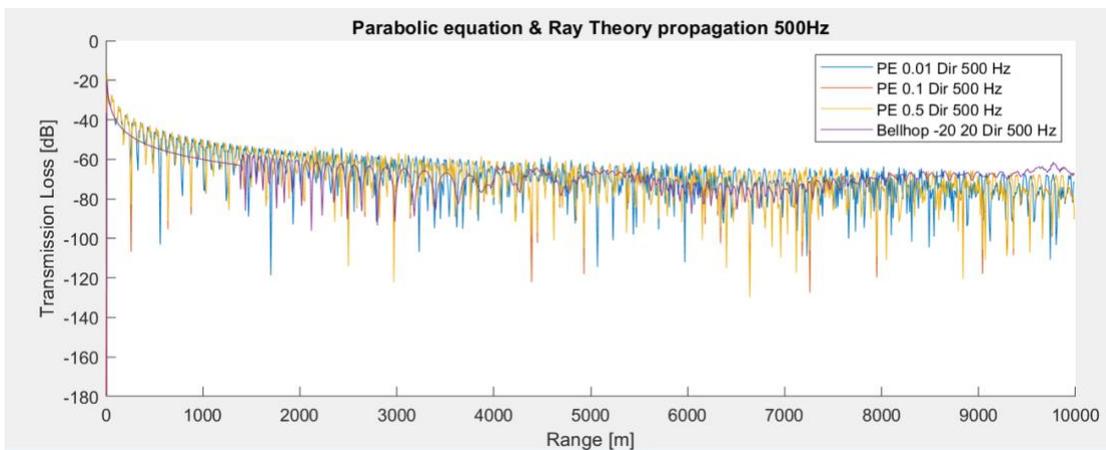
Respecto a la variación de frecuencia se observa como en este caso a medida que esta se incrementa ambos métodos ofrecen resultados similares a las frecuencias bajas.



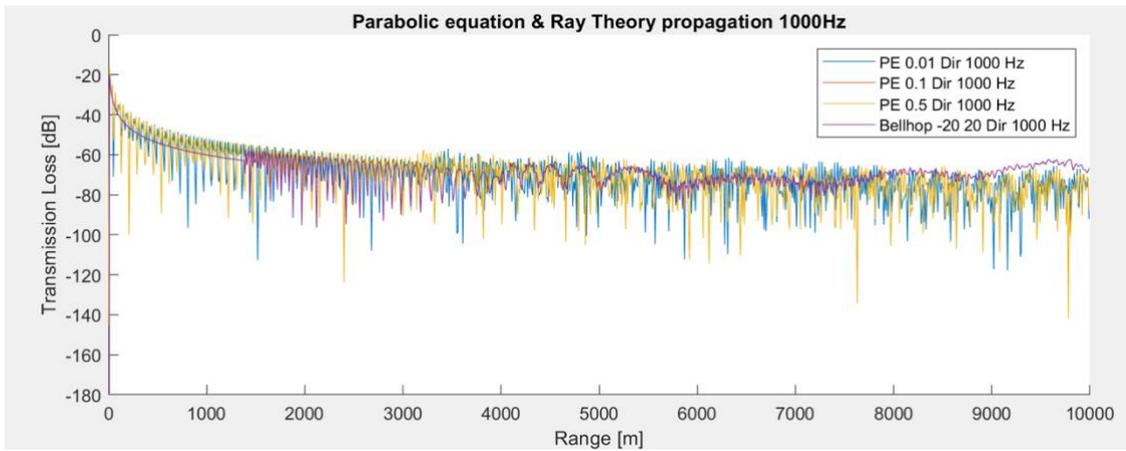
Gráfica 7. Velocidad gradiente y fondo plano (63 Hz)



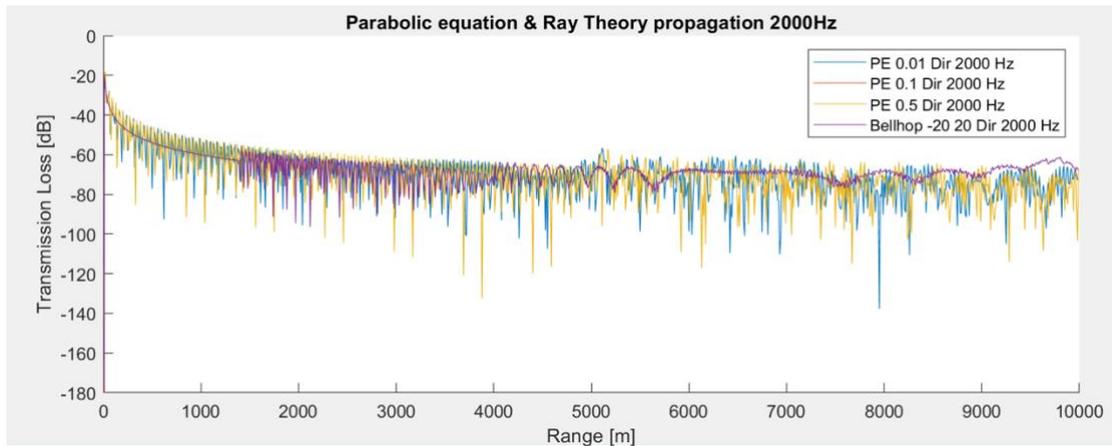
Gráfica 8. Velocidad gradiente y fondo plano (125 Hz)



Gráfica 9. Velocidad gradiente y fondo plano (500 Hz)



Gráfica 10. Velocidad gradiente y fondo plano (1000 Hz)

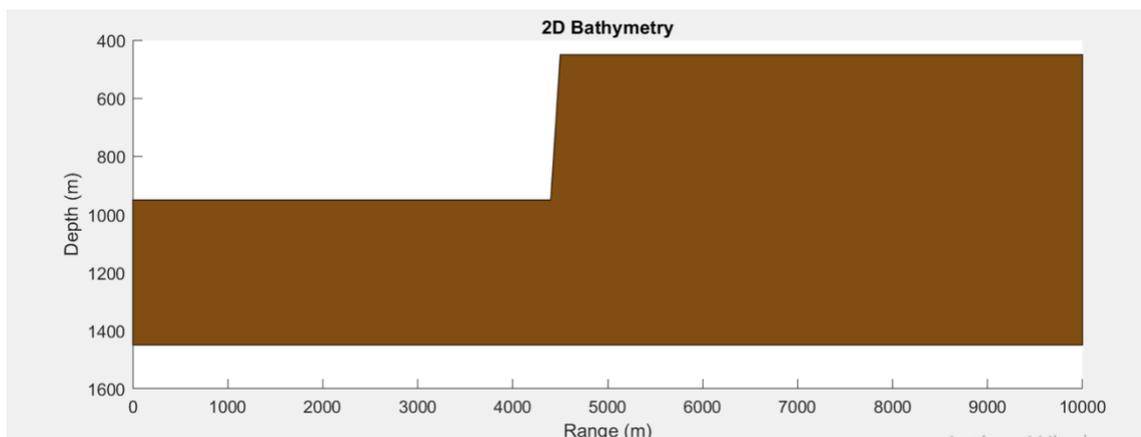


Gráfica 11. Velocidad gradiente y fondo plano (2000 Hz)

6.3 Velocidad variable y fondo en forma de escalón

Después de analizar en los dos primeros apartados el comportamiento variando solo la velocidad, lo que se presenta en el siguiente apartado es la variabilidad tanto de velocidad como de fondo, en este caso en forma de escalón.

Se incluye la grafica de batimetría con fondo en forma de escalón, en el que manifestaremos como varia, en forma de escalón, donde a partir de los 4500 m de rango, la profundidad del mar será mayor.

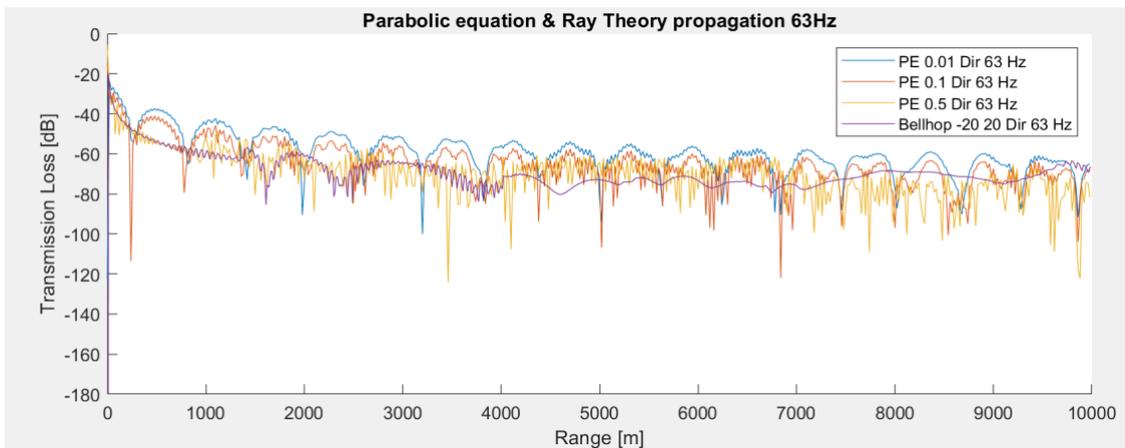


Gráfica 12. Batimetría con fondo en forma de escalón

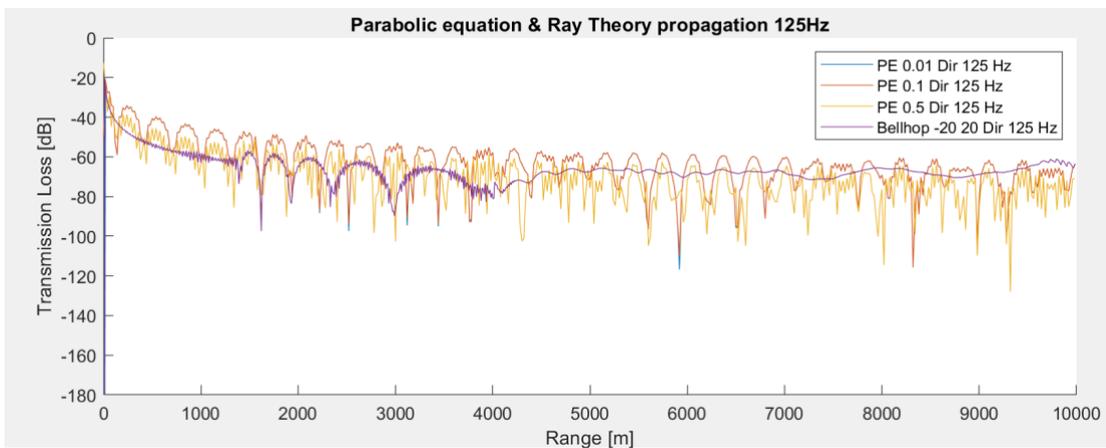
A diferencia de casos anteriores, la variación de frecuencia se observa como en este caso a medida que esta se incrementa, Bellhop ofrece resultados con peor convergencia, como apunta la teoría de modelos de propagación.

También ocurre, que a medida que la frecuencia aumenta, la técnica de PE de diferentes aperturas de la fuente Gaussiana (0.01, 0.1, 0.5), acaba convergiendo en la misma.

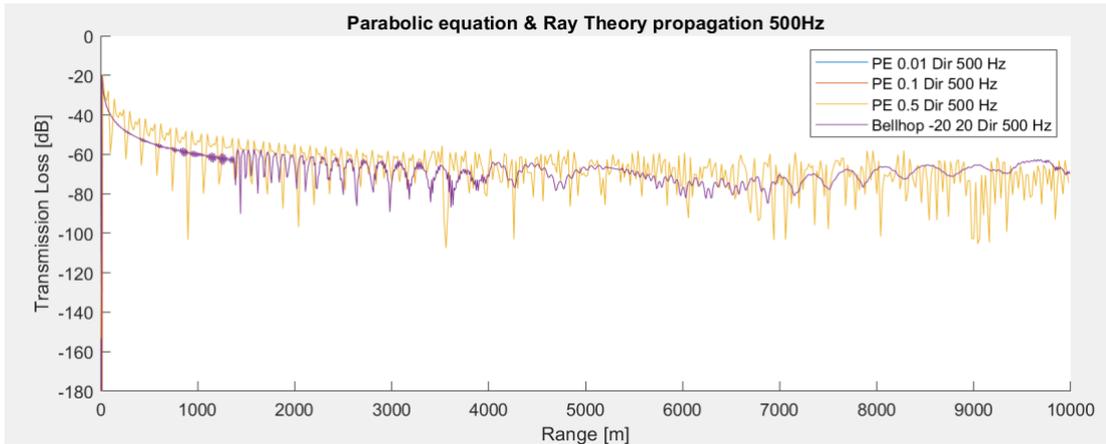
En este caso, podemos concluir que la técnica de propagación de Bellhop, obtendría menor pérdida de transmisión que la técnica de la ecuación de onda parabólica donde llega a rozar los -130 dB (para una directividad de la fuente de 0.5).



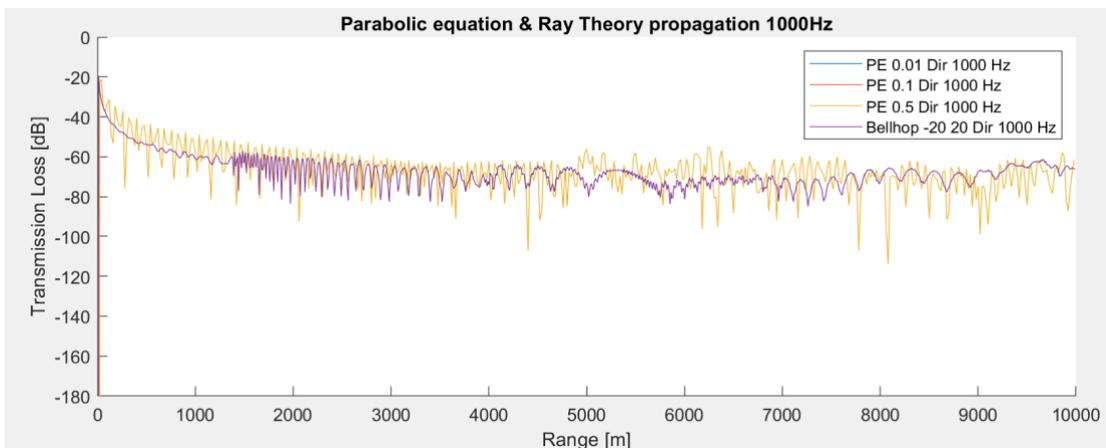
Gráfica 13. Velocidad gradiente y fondo en forma de escalón (63 Hz)



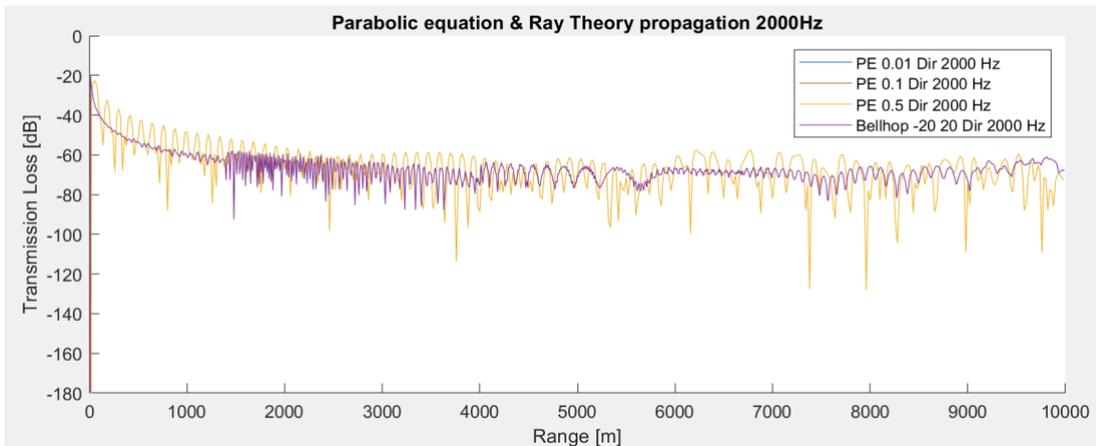
Gráfica 14. Velocidad gradiente y fondo en forma de escalón (125 Hz)



Gráfica 15. Velocidad gradiente y fondo en forma de escalón (500 Hz)



Gráfica 16. Velocidad gradiente y fondo en forma de escalón (1000 Hz)

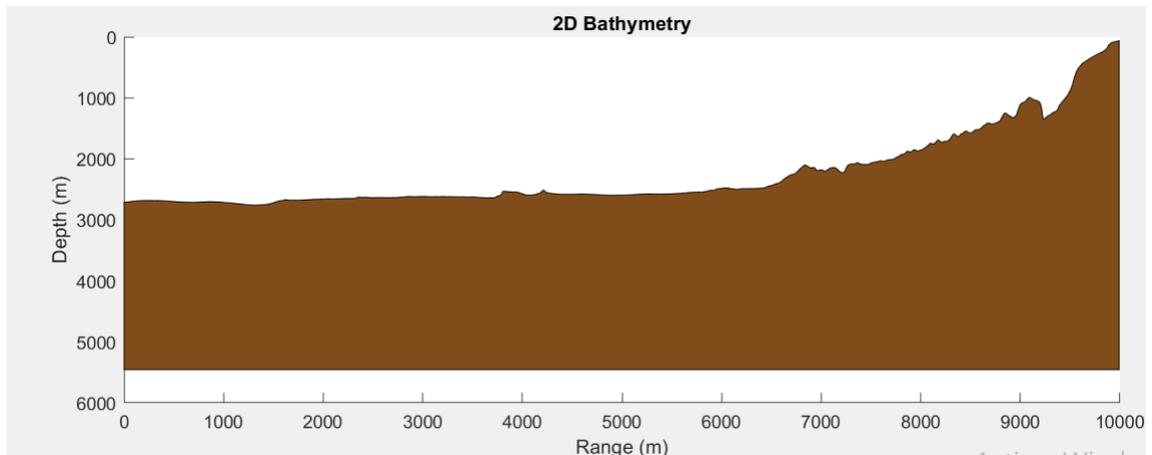


Gráfica 17. Velocidad gradiente y fondo en forma de escalón (2000 Hz)

6.4 Velocidad variable y fondo batimétrico real

Por último, se decidió a analizar las diferentes técnicas de propagación con velocidad gradiente y fondo batimétrico real, este caso será de todos el más próximo a la realidad.

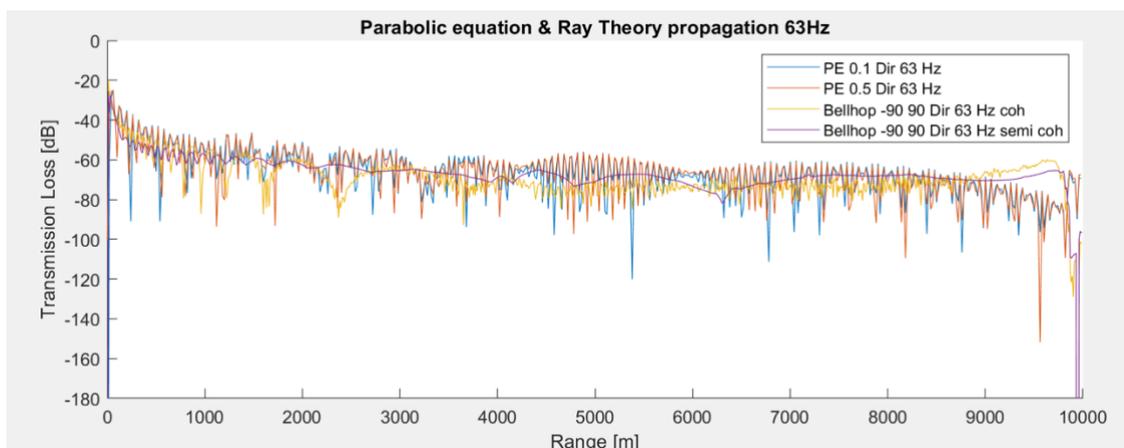
Se incluye la grafica de batimetría con fondo real, en el que manifestaremos como varia, de forma exponencial conforme aumenta el rango.



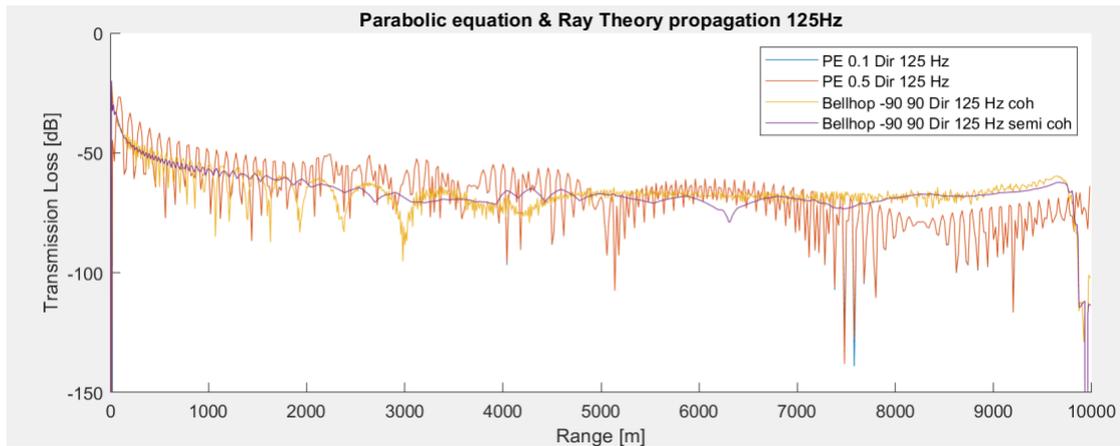
Gráfica 18. Fondo batimétrico real

Respecto a la variación de frecuencia, se observa que a medida que esta se incrementa, ambos métodos ofrecen resultados con mayor divergencia, como apunta la teoría de modelos de propagación.

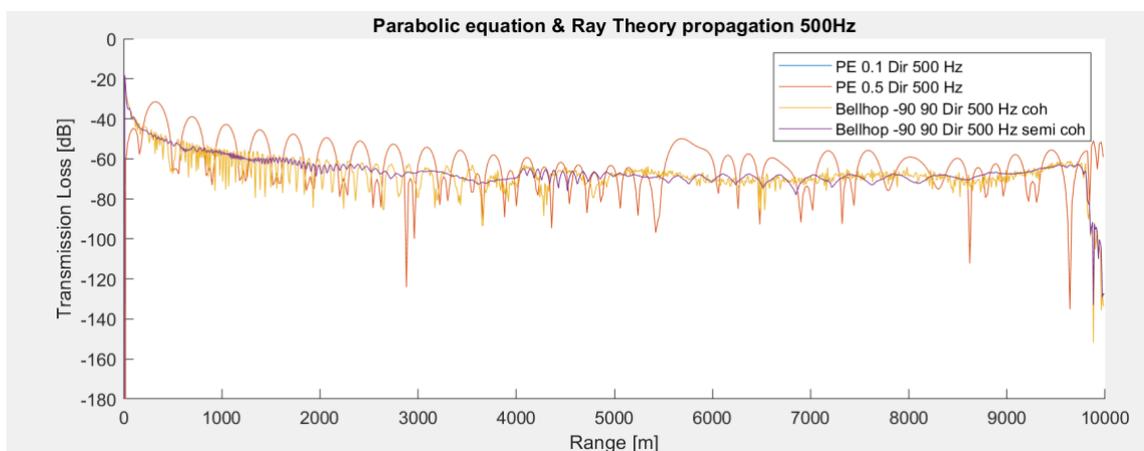
En este caso, podemos concluir que la técnica de propagación de Bellhop, y la técnica de la ecuación de onda parabólica, llegados a un rango mayor de 8000 metros, pierden totalmente la representación incesante, hasta llegar a los -180 dB de pérdida. Mientras aumenta la frecuencia, y al contrario de lo ocurrido en los anteriores casos, los modelos no muestran mejoría en la convergencia.



Gráfica 19. Velocidad gradiente y fondo batimétrico real (63 Hz)



Gráfica 20. Velocidad gradiente y fondo batimétrico real (125 Hz)



Gráfica 21. Velocidad gradiente y fondo batimétrico real (500 Hz)

7. Conclusiones y discusión

Como conclusiones derivadas de este proyecto podemos destacar:

- Se examina como la convergencia de los resultados depende mucho del tipo de apertura de la fuente en el caso de la ecuación de onda parabólica, en el que experimentamos con aperturas de la fuente Gaussiana (0.01, 0.1, 0.5), y en el caso del trazado de rayos. Podemos concluir que la apertura utilizada para la fuente en uno u otro método sean similares, para así tener una convergencia mayor.
- La apertura de la fuente en el caso de la simulación PE se parametriza mediante la apertura de la fuente gaussiana utilizada, obteniendo mayor convergencia para las simulaciones con valor de 0.1, podemos



ver un claro ejemplo en la simulación 1, donde la velocidad es constante y el fondo plano.

- A pesar de que las diferencias en todas las simulaciones son pequeñas, existe una mayor convergencia a medida que se aumenta la frecuencia, siendo esto coherente con lo predicho por la teoría, y como hemos resaltado en el primer caso.
- Los resultados presentan una convergencia aceptable en todas las simulaciones realizadas, incluso para el caso de considerar aguas poco profundas.
- Se puede estimar que ambos métodos presentan una coherencia en los resultados mostrados, siendo métodos susceptibles de ser utilizados para la evaluación de impacto ambiental por fuente de ruido antropogénico, por ejemplo, debido al tráfico marítimo.
- Ambos métodos pueden ser una herramienta útil para realizar estudios de impacto de ruido a través de mapas de ruido 2D.

8. Bibliografía

[1] Directiva Marco sobre la Estrategia Marina. (2019). [online] © Ministerio para la Transición Ecológica. Available at: https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/proteccion-internacional-mar/union-europea-proteccion-medio-marino-y-costero/dm_estrategia_marina.aspx [Accessed 8 Aug. 2019].

[2] López Tacoronte, A. (2019). “Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos”. [ebook] Área de Conocimiento de Ciencias y Técnicas de La Navegación: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Available at: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5941/Propagacion%20de%20ondas%20acusticas%20en%20espacios%20subacuaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 10 Aug. 2019].

[3] Vales, D. (2019). Un poco de historia del primer barco de vapor. [online] Excelencias del Motor. Available at: <https://www.excelenciasdelmotor.com/otras-secciones/maritimo/un-poco-de-historia-del-primer-barco-de-vapor> [Accessed 11 Aug. 2019].

[4] CIFUENTES LEMUS, J. and TORRES-GARCÍA, I. (2019). V. PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EL MAR. [online] Bibliotecadigital.ilce.edu.mx. Available at: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_8.html [Accessed 12 Aug. 2019].

[5] Franco García, M. (2019). “LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA: ESPECIAL REFERENCIA AL IMPACTO SOBRE LOS CETÁCEOS PRODUCIDO POR LOS SÓNARES DE LOS BUQUES DE GUERRA”. [online] Actualidadjuridicaambiental.com. Available at: http://www.actualidadjuridicaambiental.com/wp-content/uploads/2014/03/2014_04_Franco-Garcia_La-contaminacion-acustica-submarina-buques-guerra.pdf [Accessed 15 Aug. 2019].

[6] @Leslok, Y. (2019). Sondas Batimétricas; Cartografía Submarina. [online] Lpi.tel.uva.es. Available at: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io7/public_html/sonar1.html [Accessed 19 Aug. 2019].

[7] P Robinson, S. and Goldsmith, M. (2019). The Journal of the Acoustical Society of America. [online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/23558726_A_new_equation_for_the_accurate_calculation_of_sound_speed_in_all_oceans [Accessed 3 Sep. 2019].

[8] Clarin.com. (2019). *Acústica submarina: cómo es la ciencia que detectó la explosión en la ruta del ARA San Juan*. [online] Available at: https://www.clarin.com/sociedad/acustica-submarina-ciencia-detecto-explosion-ruta-ara-san-juan_0_rkyt_HoeG.html [Accessed 22 Aug. 2019].

[9] Arias Alfonso, A. (2019). [online] Available at: https://www.academia.edu/33355420/Algoritmo_para_la_detecci%C3%B3n_de_embarcaciones_-_Ac%C3%BAstica_Submarina_Tesis_de_grado_ [Accessed 22 Aug. 2019].

[10] Es.wikipedia.org. (2019). Sonar. [online] Available at: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sonar> [Accessed 22 Aug. 2019].

[11] Lpi.tel.uva.es. (2019). Aplicaciones. [online] Available at: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/subacuatic a/Aplicaciones.htm [Accessed 22 Aug. 2019].

[12] J.S., S. and J.M., B. (2019). [online] Digital.csic.es. Available at: http://digital.csic.es/bitstream/10261/6014/1/Underwater_00.pdf [Accessed 22 Aug. 2019].

[13] Bradley, D. (2019). Sondear los secretos del océano. [online] National Academies. Available at: <https://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/Sondear%20los%20secretos%20del%20oc%C3%A9ano.html> [Accessed 22 Aug. 2019].

[14] Aparicio, J. and Garcia, E. (2019). Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I). [online] Geintra-uah.org. Available at: http://geintra-uah.org/system/files/modelos_de_propagacion_de_senales_acusticas_en_entornos_subacuaticos_i_y_ii-vdef.pdf [Accessed 22 Aug. 2019].

- [15] Felis Enguix, I., Sánchez Egea, M. and Guerrero González, A. (2019). Acoustic characterization of impulsive underwater noise present in port facilities. Practical case of the Port of Cartagena. [online] Sciforum.net. Available at: <https://sciforum.net/manuscripts/5755/manuscript.pdf> [Accessed 22 Aug. 2019].
- [16] López Tacoronte, A. (2019). "Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos. [online] Riull.ull.es. Available at: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5941/Propagacion%20de%20ondas%20acusticas%20en%20espacios%20subacuaticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 23 Aug. 2019].
- [17] Wikillerato.org. (2019). Propagación de una perturbación en un medio - Wikillerato. [online] Available at: http://www.wikillerato.org/Propagaci%C3%B3n_de_una_perturbaci%C3%B3n_en_un_medio.html [Accessed 23 Aug. 2019].
- [18] de Santiago Collada, J. (2019). Apuntes de Acústica Submarina. [online] <https://www.academia.edu/>. Available at: https://www.academia.edu/31989418/Apuntes_de_Ac%C3%B3stica_Submarina [Accessed 23 Aug. 2019].
- [19] E-educativa.catedu.es. (2019). 5. Aplicaciones de las ondas sonoras. [online] Available at: http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3212/html/5_aplicaciones_de_las_ondas_sonoras.html [Accessed 23 Aug. 2019].
- [20] Wwww7.nationalacademies.org. (2019). Sondear los secretos del océano. [online] Available at: http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/ear_007522-05.html [Accessed 23 Aug. 2019].
- [21] Bolin, K. and Boué, M. (2019). Long range sound propagation over a sea surface. [online] [researchgate.net](https://www.researchgate.net). Available at: https://www.researchgate.net/publication/38072207_Long_range_sound_propagation_over_a_sea_surface [Accessed 27 Aug. 2019].

[22] P Robinson, S. and Goldsmith, M. (2019). The Journal of the Acoustical Society of America. [online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/23558726_A_new_equation_for_the_accurate_calculation_of_sound_speed_in_all_oceans [Accessed 3 Sep. 2019].

[23] B. Porter, M. (2019). BELLHOP3D User Guide. San Diego, CA 92130: Heat, Light, and Sound Research, Inc.

[24] B. Porter, M. (2019). The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT. 1st ed. La Jolla, CA, USA: Heat, Light, and Sound Research, Inc.

[25] Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas. (2019). Part II: Monitoring Guidance Specifications.

[26] Odeon.dk. (2019). Ray tracing – Odeon A/S. [online] Available at: <https://odeon.dk/product/ray-tracing/> [Accessed 9 Sep. 2019].

[27] Anon, (2019). Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (II). [online] Available at: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Perfil-tipico-para-latitudes-medias-Una-vez-que-se-conoce-la-forma-del-perfil_fig2_271074942 [Accessed 9 Aug. 2019].

[28] Garrett JK, e. (2019). Long-term underwater sound measurements in the shipping noise indicator bands 63Hz and 125Hz from the port of Falmouth Bay, UK. - PubMed - NCBI. [online] Ncbi.nlm.nih.gov. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27393210> [Accessed 9 Sep. 2019].