

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA COMUNICACIONES EN ENTORNOS ACÚSTICOS SUBMARINOS

Comparative analysis of propagation models for communications in underwater acoustic environments

Erika Viviana Ñaupá Shagñay ¹	erika.niaupa@esPOCH.edu.ec
Stalin Bolívar Molina Molina ²	stalin.molina@esPOCH.edu.ec

^{1,2} Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) Riobamba, Ecuador.

RESUMEN

Este documento presenta un análisis comparativo de los modos de propagación referente a la importancia de la forma del perfil de la velocidad del sonido, y para determinar la pérdida de transmisión del campo acústico generado por ondas acústicas que se propaga en el agua.

Estos son usados para obtener la representación gráfica de las pérdidas de transmisión dependiendo de la distancia y la profundidad. Se obtienen las respectivas graficas a raíz de su simulación según el modo propagado y la contribución lateral de la onda, de esa forma con los parámetros que se exponen se determina el modelo más eficiente en propagación acústica. La comparativa radica en ver los detalles de cada modelo y tener en cuenta a más de la eficiencia los errores que también pueden existir, además de ello en conjunto con minúsculos detalles suscritos, aprender varias teorías para llegar a un resultado propicio.

Palabras Clave: Modelos, distancia, pérdidas, profundidad, propagación, rayos.

to determine the transmission loss of the acoustic field generated by an acoustic wave propagating in water.

These modes are used to obtain the graphical representation of the transmission loss depending on distance and depth. The respective graphs are obtained as a result of their simulation taking into account the propagated mode and the lateral contribution of the wave, thus with the parameters that are exposed can determine the most efficient model when used in acoustic propagation. The comparative lies in seeing the details of each model and in such a way to observe, to be able to take into account in addition to the efficiency the errors that can also exist, in addition to it in conjunction with tiny details subscribed, to learn several theories to arrive at a propitious result.

Keywords: Models, distance, losses, depth, propagation, lightning.

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of the propagation modes with respect to the importance of the shape of the sound velocity profile, and also

► I. Introducción

La comunicación acústica subacuática es un método para enviar y recibir mensajes bajo el agua [1]. Se ha utilizado en una variedad de tareas, incluida la vigilancia del medio ambiente, el control de vehículos submarinos, el análisis del fondo marino y la detección de objetos. La utilización de ondas acústicas es un patrón repetido en todas

ellas. Esto se debe a las características que tiene este tipo de medios, que lo hacen ideal para su uso en comparación con las ondas electromagnéticas. Aunque las ondas acústicas son mejores para las comunicaciones submarinas, también hay muchos desafíos que tener en cuenta. El océano y los mares son los principales medios subacuáticos [2].

Se puede considerar que este medio tiene efectos similares a los de la atmósfera, como atenuación y absorción, presencia de ruido y multicamino, la atenuación por absorción es uno de los principales efectos observados: una onda electromagnética experimenta una disminución en función de su frecuencia. La alta conductividad del agua del mar es la causa de esta pérdida de intensidad. Se observan múltiples caminos creados por el rebote de las ondas tanto en la superficie como en el fondo marino cuando es necesario establecer una comunicación a determinada distancia entre transmisor y receptor. Por lo tanto, es necesario desarrollar un modelo del medio subacuático para facilitar la comunicación.

En este artículo se describe la propagación de señales en entornos subacuáticos, mismas que cobran una importancia análoga a la radiofrecuencia en aire, la acústica subacuática que implica el desarrollo y el empleo de métodos acústicos para obtener imágenes de las características submarinas, para comunicar información a través del agua, guía de ondas, o para medir las propiedades oceánicas. Se aborda los parámetros fundamentales de los que depende la propagación acústica en el agua y los 3 modelos existentes que estudian dicha propagación.

En su sentido más fundamental, el modelado es un método para organizar el conocimiento acumulado a través de la observación o deducido de los principios subyacentes [3]. A continuación se menciona de manera rápida los resultados que proporciona el modelo de trazado de rayos, siendo el más utilizado, este modelo se basa en la consideración de que la energía de la onda se puede concentrar en caminos definidos, de manera que se puede pensar en rayos en lugar de ondas y esto viene a ser válido siempre que la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no

sea tan variante en una longitud de onda, dicho esto, la condición se cumplirá mejor para altas frecuencias, puesto que la longitud de onda será más pequeña. El modelo de trazado de rayos lo que hace es calcular las ecuaciones que siguen los rayos, utilizando la herramienta de simulación Matlab para una comparación eficiente entre gráficos de los distintos campos a tratar dentro de cada modelo: un ejemplo es el campo de presiones que generan, del cual se puede obtener las pérdidas de transmisión, y el tiempo de propagación de dichos rayos.

» II. Canal acústico subacuático

Una estructura destinada a transmitir señales acústicas por largos períodos de tiempo a través del agua se conoce como línea de transmisión acústica subacuática [4]. Existen parámetros importantes como la velocidad del sonido y la pérdida de transmisión de cada elemento. A continuación, se analizarán los distintos parámetros que influyen en el modelado del canal submarino.

A. Velocidad del sonido

La velocidad de propagación de las ondas de sonido es un parámetro que describe cómo se desplazan en el medio [5]. Las ondas acústicas corresponden a un tipo especial de ondas: las ondas mecánicas. La peculiaridad de este tipo de ondas es que dependen de un medio elástico. Esto permite la propagación de perturbaciones a través de dicho medio [6].

Además, es la velocidad a la que una onda longitudinal recorre un medio determinado, creando un continuo de compresión y expansión, que el cerebro interpreta como sonido [7]. El "perfil de velocidad del sonido", muestra los cambios en la velocidad de propagación del sonido en función de la profundidad del océano mediante ilustraciones. La ubicación geográfica, la estación y las condiciones meteorológicas pueden ser factores que afectan esta representación [8]; viene determinado por la relación entre la velocidad del sonido y la profundidad, influirá en la forma en que se propague la irrupción acústica. La ecuación

de la velocidad del sonido se obtiene a partir de la misma ecuación de onda lineal:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma B_T}{\rho_0}} \quad (1)$$

Donde, c es la velocidad del sonido en m/s, γ es el índice adiabático, ρ_0 es la densidad de equilibrio, B_T es el módulo de compresibilidad isotérmica.

A su vez, estas magnitudes dependen de otros parámetros, como la temperatura, la salinidad y la presión del agua. El valor típico de la velocidad de una onda acústica es de media 1500 m/s, aunque puede tomar valores entre 1450 y 1550 m/s [9]. Es crucial comprender cómo se producen las variaciones en la velocidad del sonido en función de los parámetros mencionados anteriormente. Es necesario investigar cómo estos parámetros cambian a su vez con respecto a la profundidad para lograrlo.

Tabla I.

VALORES DE DENSIDAD Y VELOCIDAD DEL SONIDO

Medio	Densidad [Kg/m ³]	Velocidad del sonido [m/s]
Aire	1,2	340
Agua	1030	1500
Aceites	900	1200-1700
Aluminio	2700	5000-6000
Resinas y plásticos	1000-1500	1000-2000

La temperatura del agua (mar, ríos grandes, etc.) disminuye hacia el fondo desde la superficie. En las capas menos profundas, la variación es más alta debido a una variedad de factores, como la combinación de corrientes de agua, el calor de la luz solar y las estaciones del año [10]. El valor promedio de la temperatura disminuye ligeramente con la profundidad a medida que aumenta la profundidad.

La presión hidrostática es la responsable directa de los cambios en la velocidad del sonido con respecto a la profundidad [11]. Cuando se trata de aguas marinas, también están formadas por una mezcla de agua pura y sales disueltas.

A lo largo de los años se han estudiado diferentes ecuaciones semi-empíricas para expresar la velocidad del sonido en ambientes marinos. Por

lo tanto, se realizan mediciones de los diversos parámetros involucrados, como la temperatura, la presión y la concentración de sal, de las cuales las dos ecuaciones más utilizables son las Del Grosso y Chen y Millero [12]. La ecuación de Grosso, Ec. 2 data de 1974. Los términos son función de la temperatura T , la presión P y la salinidad S .

$$c(S,T,P) = 1402,392 + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (2)$$

Por otro lado, existe la ecuación de Chen y Millero, Ec. 3 expuesta en 1977, de igual forma los términos son función de la temperatura T , presión P y salinidad S , además esta ecuación fue reconocida por la UNESCO como estándar para el cálculo de la velocidad de propagación en ambientes marinos [13].

$$c(S,T,P) = c_0 + c_1 P + c_2 P^2 + c_3 P^3 + AS + BS^{\frac{3}{2}} + CS^2 \quad (3)$$

1. Perfil de la velocidad del sonido

Con los perfiles de velocidad se puede determinar de qué forma se va a propagar una señal acústica por este tipo de medios existen zonas donde la velocidad del sonido es diferente, pues aparece una curvatura de las ondas acústicas cuando son transmitidas en zonas de velocidad baja.

Es posible generar gráficos de la velocidad del sonido en función de la profundidad, denominados perfiles de velocidad. En el caso de las latitudes medias, se representa un tipo de perfil dividido en diferentes capas, cada una con sus propias características, como se muestra en la Fig. 1.

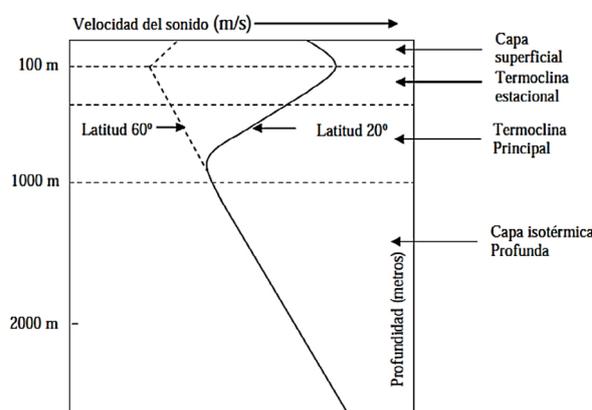


Fig. 1. Perfiles de velocidad del sonido.

Sin embargo, las diferentes capas se detallan a continuación:

- Capa superficial: comprendida entre la superficie y una profundidad que varía entre los primeros 50 m y los 100 m. Se ve afectada por el movimiento de las masas de agua (en este caso). A lo largo de esta capa, la velocidad permanece prácticamente constante [14].
- Termoclina estacional: se extiende aproximadamente entre 100 m y 200 m, dependiendo de la hora del día, las latitudes y la estación del año. Presenta una variación de temperatura prácticamente monótona, con un gradiente positivo.
- Termoclina principal: Se extiende desde los límites de la capa anterior hasta 1600 m o 2000 m de profundidad. Se produce un descenso aproximadamente lineal de la temperatura y, a su vez, una disminución de la velocidad.
- Isotherma profunda: temperatura constante. La velocidad aumenta linealmente con la profundidad (debido a la presión hidrostática), el perfil es aproximadamente lineal.

B. Modelo de trazado de rayos

En este modelo se menciona que la energía de una onda puede concentrarse en trayectorias claramente definidas, por lo que es posible considerar rayos en lugar de ondas. Esto es válido siempre que la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varíen considerablemente a lo largo de una longitud de onda [15]. Aquí se estudian básicamente los efectos de refracción de los rayos sonoros en medios donde la velocidad del sonido varía con la profundidad, pero con un comportamiento constante en diferentes capas horizontales a lo largo de toda la columna de agua. "Además, se considera que la reflexión es de tipo especular, por lo que la pérdida de energía es mínima" [16].

C. Pérdidas de transmisión

Hay dos factores tras los cuales la presión de irrupción pierde energía en el CAS, dando lugar a

TL (pérdidas de transmisión) [17].

1. Por un lado, están las pérdidas geométricas TL_g , que se deben a que la energía de la onda entrante se dispersa por una superficie mayor.

$$TL_g = 10klogd \quad (4)$$

Donde, d es la distancia de enlace en metros y k es el factor de propagación (1 para propagación cilíndrica, 2 para propagación esférica, 1,5 para propagación intermedia).

2. El otro componente de las pérdidas por transmisión se debe al efecto de absorción de la energía acústica por el medio, TL_α .

$$TL_\alpha = \alpha \cdot d \quad (5)$$

Donde, α (dB/km) es el coeficiente de absorción, que depende de los parámetros del agua y de la frecuencia de la onda. Una de las expresiones semi empíricas más utilizadas para este coeficiente es la de Thorp, validada hasta frecuencias en kilohercios, temperaturas de 4°C y una profundidad de 900 m [18].

$$\alpha = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.0003 \quad (6)$$

Otra expresión más contemporánea es la dada por Francois y Garrison, que es apropiada para frecuencias entre 100 Hz y 1 MHz.

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (7)$$

Así, las pérdidas por transmisión son:

$$TL = TL_g + TL_\alpha \quad (8)$$

» III. Modelos de Propagación

Existen varios modelos de propagación de señales acústicas, pero este artículo se centra en tres modelos que ponen de relieve la importancia de la forma del perfil de velocidad del sonido.

A. Propagación en aguas poco profundas

Según este concepto, la profundidad de la columna de agua es sólo un pequeño número de longitudes en tierra y, en consecuencia, la naturaleza ondulatoria del sonido determinará la distancia que puede recorrer. En este caso, también se indica que el número de reflexiones en la superficie aumenta por unidad de longitud. Esto significa que, en aguas poco profundas, la reflexión superficial y las pérdidas resultantes aumentan [19].

Para este caso, existe una interacción muy importante de la señal acústica con el fondo, posibles variaciones de profundidad, etc. que invocan el modelo de Colossus, obtenido a partir de una gama de frecuencias comprendida entre 100 Hz y 10 kHz [20]. Se tienen en cuenta la altura de las olas, el tipo de fondo, la profundidad de la columna de agua, la frecuencia y el perfil de velocidad del sonido.

Se considera que este perfil se compone de dos segmentos coherentes:

- Desde la superficie del océano hasta una profundidad de L (metros), la velocidad del sonido aumenta linealmente con la profundidad.
- A profundidades superiores a L, la velocidad disminuye a medida que aumenta la profundidad hasta llegar al fondo.

1. Distancia de transmisión (H): Distancia máxima a la que un rayo entra en contacto con la superficie o el fondo [21].

$$H = \sqrt{\frac{L + D}{3}} \tag{9}$$

Donde, D es la profundidad de la columna de agua en metros.

2. Pérdidas de transmisión (TL)

$$\left\{ \begin{array}{l} TL = 20\log R + \alpha R + 60 - k_L, \text{ para } R < H \\ TL = 15\log R + \alpha R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 5\log H + 60 \\ \quad - k_L, \text{ para } H < R < 8H \\ TL = 10\log R + \alpha R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 10\log H + 64.5 \\ \quad - k_L, \text{ para } R < 8H \end{array} \right.$$

Donde, R (Km) es la distancia, α (dB/Km) es el coeficiente de absorción, K_L (dB) es la anomalía de campo cercano, mide la ganancia debida a los rebotes entre el fondo y la superficie, y A_T (dB/rebote) es el coeficiente de atenuación efectiva, considera las pérdidas debidas al acoplamiento de energía entre la superficie y el fondo.

B. Canal superficial

El conducto superficial se refiere al hecho de que cuando los vientos superficiales y las olas mezclan las capas poco profundas del mar, se produce una capa isotérmica en la que domina el efecto de presión y la velocidad del sonido aumenta al aumentar la profundidad, con valores de profundidad en el rango de 50 a 100 m [22].

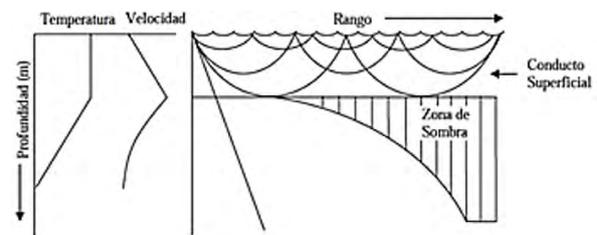


Fig. 2. Propagación del sonido a través del conducto superficial.

La señal se propaga esféricamente al principio, pero después de una distancia de transición r_t , la propagación puede considerarse cilíndrica, ya que la energía está confinada.

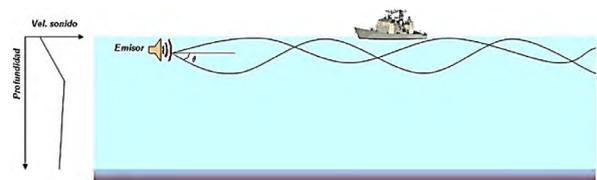


Fig. 3. Propagación a través del canal de superficie con ángulo de inclinación.

Expresando así las ecuaciones de pérdida de transmisión y distancia de transición.

1. Distancia de transición

$$r_t = \frac{0.3048}{2} H \sin \theta \tag{11}$$

Donde, H (m) es la profundidad del canal, y θ el ángulo del haz atrapado con la pendiente más pronunciada dentro del canal.

2. Pérdidas de transmisión

$$TL = 10\log r_t + 10\log r + (\alpha + \alpha_L)r \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Donde: r (m) es la distancia, α (dB/km) es el coeficiente de absorción y α_L (dB/km) es el coeficiente de fuga, que considera la energía que escapa del canal debido a la dispersión de la señal en la superficie y a la difusión transversal, originada por la discontinuidad del perfil de velocidad del sonido en la base del canal.

C. Canal acústico profundo

El haz del sonar se enfoca hacia abajo, hacia ángulos con una inclinación considerable respecto a la horizontal. La eficacia del método depende de las características del fondo marino, que puede ser absorbente o reflectante. Además, las pérdidas provocadas por el fondo dependen del ángulo de incidencia [23]. En este perfil, a una profundidad de aproximadamente 1 km, hay un mínimo en la velocidad del sonido que sirve de límite del canal acústico. Si una señal acústica se emite cerca y se curva hacia este mínimo, y el ángulo de emisión es suficientemente pequeño, la señal se propaga sin interactuar ni con la superficie ni con el suelo, formando un canal acústico profundo.

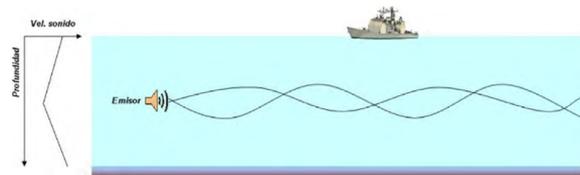


Fig. 4. Propagación a través del canal acústico profundo

La divergencia geométrica será inicialmente esférica hasta que alcance la distancia de transición r_t , momento en el que puede decirse que es cilíndrica.

1. Distancia de transición

$$r_t = \frac{r_s}{8} \sqrt{\left(\frac{D_s}{z_s}\right)} \quad (13)$$

Donde, D_s la profundidad a la que se encuentra la velocidad mínima del sonido en el canal superficial z_s es la profundidad del emisor medida desde la

base del canal superficial (que marca el inicio del canal más profundo), y r_s es la distancia del salto, que depende de las distancias entre el ecuador del canal superficial y sus límites.

2. Pérdidas de transmisión (TL): si y sólo si la distancia es tal que la divergencia ya es sustancial.

$$TL = 10\log r_t + 10\log r + (\alpha)r \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

Donde: r (m) es la distancia, y α (dB/Km) es el coeficiente de absorción.

» IV. Metodología

Para poder evolucionar en el proceso del análisis comparativo de los modelos de propagación acústica descritos anteriormente, es importante conocer los resultados de los modelos expuestos en el software Matlab para poder ver los parámetros importantes, el perfil de velocidad del sonido, las pérdidas por transmisión, y una trayectoria de trazado de rayos donde se puede determinar cómo y cuántos han rebotado en la superficie o fondo de cada uno de los modelos.

Más adelante se mostrarán los gráficos de las simulaciones realizadas para los tres casos presentados: el canal de aguas poco profundas, el canal poco profundo y el canal acústico profundo. Recordando que el método de trazado de rayos es el utilizado en este tema.

En todas las simulaciones, se ha tenido en cuenta utilizar una cimentación de arena fina con una densidad de 1941 Kg/m³, una columna de agua con una densidad de 1024 Kg/m³, no se ha tenido en cuenta la presencia de ondas transversales en el fondo, haciendo que el fondo sea completamente plano como la superficie del océano.

Dado que se han supuesto superficies completamente planas y, por tanto, no hay incertidumbre en cuanto a la interacción de la señal con estas superficies, se ha tenido en cuenta la fase de los distintos rayos en el caso de pérdidas de transmisión (cálculo coherente).

A. Propagación en aguas poco profundas

Lo que se muestra en este modelo son los parámetros ya descritos anteriormente, pero en este caso con su respectiva simulación.

1. Perfil de la velocidad del sonido

Los datos considerados son los siguientes:

- El fondo es de 100 m de profundidad.
- La profundidad máxima es de 250 m.
- Velocidad constante en el agua de 1500 m/s.
- Velocidad constante en la arena final comparable a 1749 m/s.

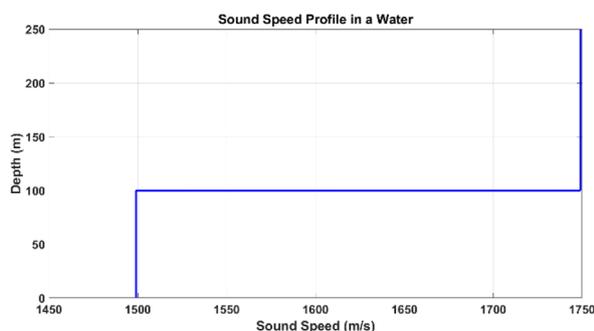


Fig. 5. Perfil de velocidad del sonido en aguas poco profundas.

En la Fig. 5, lo que se puede observar según los datos establecidos es que el fondo se identifica con la línea horizontal permaneciendo estable desde una velocidad constante en el agua igual a 1500 m/s hasta 1749 m/s (velocidad constante de la arena fina).

En la Fig. 5, lo que se puede observar según los datos establecidos es

2. Propagación de rayos

Los datos considerados son los siguientes:

- Número de rayos: 25 por razones de claridad visual.
- Se propone una red de receptores espaciados a 2 kilómetros de la fuente y colocados cada 5 metros de profundidad, comenzando las trayectorias de los rayos a 10 metros de profundidad.
- El ángulo de incidencia entre cada rayo es de 5° y la frecuencia es de 30 kHz.

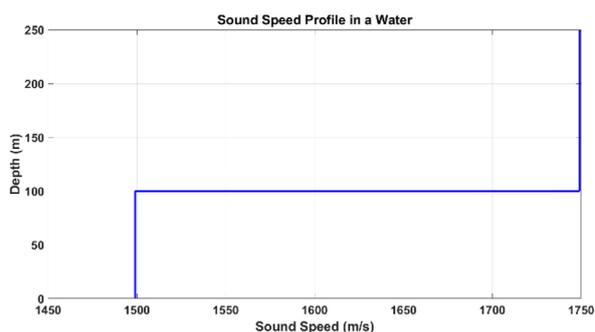


Fig. 6. Camino seguido por los rayos del sol en un entorno de aguas poco profundas.

En la Fig. 6, se puede observar que la trayectoria comienza a partir de los 10 metros de profundidad como se indica en los datos anteriores, la figura se ha adaptado para una mejor visualización, ya que los rebotes del fondo y la superficie se producen más allá de los 1500 metros, por este motivo la simulación se ha expuesto de esta forma, además en este modelo hay que tener en cuenta que hay rayos que llegan sin rebotar a la red receptora, mientras que otros sufren algún rebote con el fondo o la superficie, o varios rebotes con ambos.

3. Pérdidas de transmisión

Para este parámetro se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El número de rayos es superior a 25, ya que para las pérdidas por transmisión la propia simulación tomó como referencia un número adecuado.
- A una profundidad de 10 metros empiezan a aparecer pérdidas por transmisión.
- La distancia es la misma en 2 km.

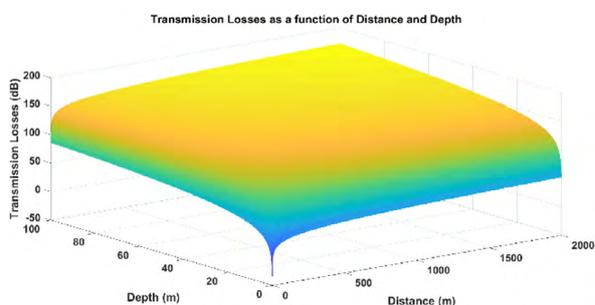


Fig. 7. Pérdidas de transmisión en entornos de aguas poco profundas en función de la distancia y la profundidad.

La Fig. 7 ilustra las pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad. Esta

ilustración muestra cómo hay zonas en las que la junta interactúa destructivamente en función de las fases de las juntas que convergen en esa zona, dando lugar a regiones en las que las pérdidas por transmisión disminuyen significativamente cerca del emisor.

B. Canal superficial

El canal de superficie desempeña un papel fundamental en el modelo de propagación de las comunicaciones submarinas y, para comprender sus características y considerar sus efectos en el diseño de los sistemas de comunicación, se han tenido en cuenta determinados valores de los criterios con los que se trabaja. Del mismo modo, se presentan los gráficos de las simulaciones de los tres parámetros considerados.

1. Perfil de la velocidad del sonido

Los datos considerados son los siguientes:

- El fondo es de 500 m de profundidad.
- La profundidad máxima es de 700 m.
- Velocidad en la superficie es de 1485 m/s.
- Velocidad constante en el agua de 1500 m/s.
- Velocidad constante en la arena final comparable a 1749 m/s.

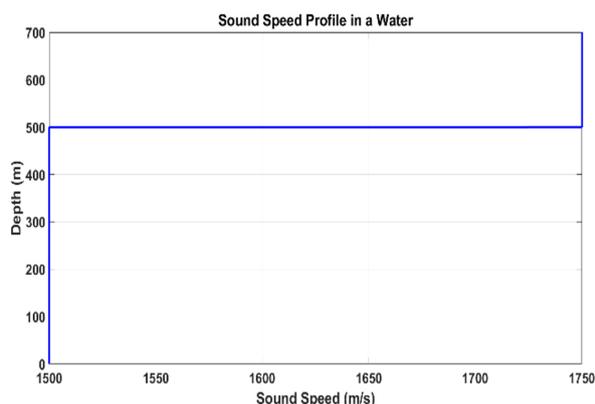


Fig. 8. Perfil de velocidad del sonido para el canal de superficie.

En la Fig. 8, lo que se observa es que el fondo está claramente representado por una horizontal que se mantiene constante a 500 metros, desde una velocidad de 1500 m/s hasta 1749 m/s o casi cerca de 1750 m/s. Estos datos se consideran debidos al modelo que estamos tratando.

2. Propagación de rayos

Los datos considerados son los siguientes:

- Número de rayos: 25 por razones de claridad visual.
- Se propone una red de receptores espaciados a 2 kilómetros de la fuente y colocados cada 5 metros de profundidad, iniciándose la trayectoria de los rayos a 50 metros de profundidad.
- El ángulo de incidencia entre cada rayo es de 5° y la frecuencia es de 20 kHz.

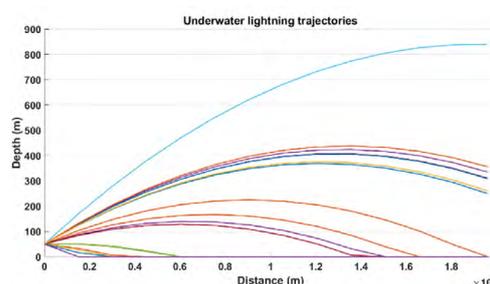


Fig. 9. Trayectoria seguida por los rayos en el canal de superficie.

La curvatura de los rayos hacia la superficie, donde se encuentra la velocidad mínima de la onda sonora, puede verse en la Fig. 9. En este caso, sólo hay repulsión con la superficie del océano a la distancia a la que se encuentran los receptores; no hay interacción con la subsuperficie.

3. Pérdidas de transmisión

Para este parámetro se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El número de rayos es superior a 25, ya que para las pérdidas por transmisión la propia simulación tomó como referencia un número adecuado.
- A una profundidad de 50 metros empiezan a aparecer pérdidas por transmisión.
- La distancia se mantiene en 2 km.

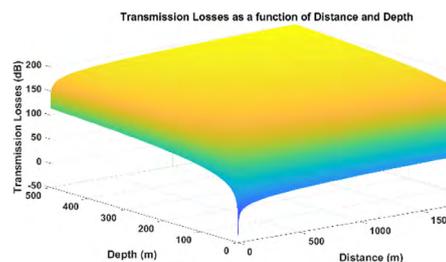


Fig. 10. Pérdidas de transmisión en el canal superficial en función de la distancia y la profundidad.

En la Fig. 10, se muestran las pérdidas por transmisión en función de la distancia y la profundidad. También se muestra un patrón de interferencias, formado por la interacción de los rayos con diversas fases. Parece que existe una región a 50 metros de profundidad y alejada de los receptores en la que las pérdidas son más conocidas.

C. Canal acústico profundo

Se debe recalcar que este patrón se produce generalmente a lo largo de cientos de metros hasta varios kilómetros, y que las señales acústicas pueden propagarse a grandes distancias.

La simulación final que se muestra es para el canal acústico profundo. Cabe mencionar que, para simular mejor en este modelo, se tomaron mayores medidas de profundidad, distancia y velocidad en comparación con los otros dos modelos.

1. Perfil de la velocidad del sonido

Los datos considerados son los siguientes

- La profundidad máxima es de 4500 m.
- El fondo es de 4000 m de profundidad.
- La velocidad en la superficie es de 1485 m/s.
- Velocidad constante en el agua de 1510 m/s.
- Velocidad constante en la arena final comparable a 1749 m/s.

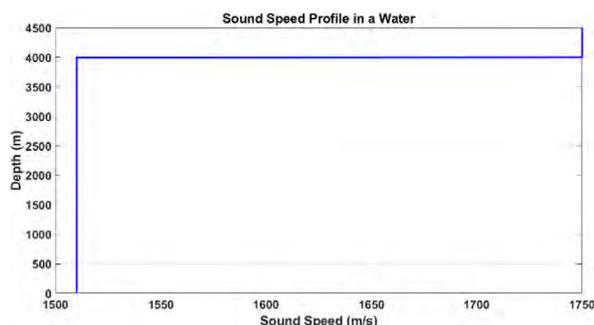


Fig. 11. Pérdidas de transmisión en el canal superficial en función de la distancia y la profundidad.

Básicamente la Fig. 11 muestra los mismos datos con alguna diferencia en las cantidades como la velocidad en el agua, estableciendo una consistencia de la misma a 4000 metros de 1510 m/s a 1749 m/s como se ha visto.

2. Propagación de rayos

Los datos considerados son los siguientes:

- Número de rayos: 25 por razones de claridad visual.
- Se propone una red de receptores espaciados a 20 kilómetros de la fuente y colocados cada 5 metros de profundidad, iniciándose la trayectoria de los rayos a 1000 metros de profundidad.
- El ángulo de incidencia entre cada rayo es de 5° y la frecuencia es de 30 kHz.

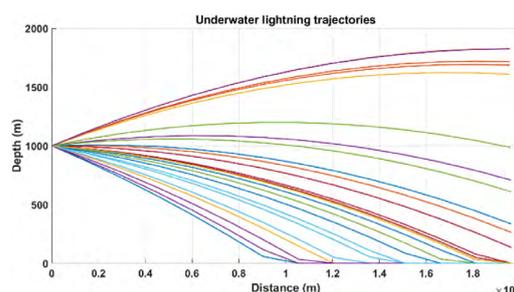


Fig. 12. Trayectoria seguida por los rayos en el canal acústico profundo.

Lo que se observa en la gráfica de la Fig. 12 es la propagación de los rayos de una forma más directa desde el emisor al receptor, no existe esa colisión incidente y recurrente con la superficie a diferencia de los modelos anteriores.

3. Pérdidas de transmisión

Para este parámetro se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El número de rayos es superior a 25.
- A una profundidad cercana a los 1000 metros, empiezan a aparecer pérdidas de transmisión.
- La distancia se mantiene en 50 km.

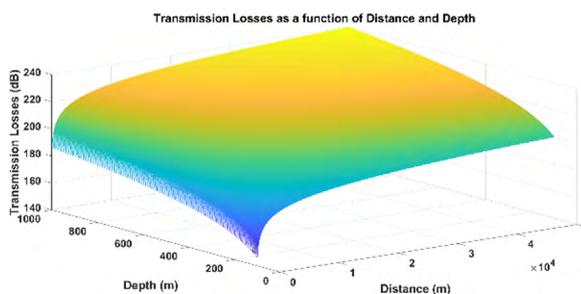


Fig. 13. Pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad para el canal acústico profundo.

Las pérdidas por transmisión obtenidas para distancia y profundidad se muestran en la Fig. 13, donde se observa que son menores cerca del ecuador acústico que en el resto debido al efecto de la refracción de los rayos en esta zona, que provoca la acumulación de estas pérdidas.

» V. Resultados

La comparación de modelos de propagación en el agua se refiere al estudio y análisis de diversos métodos utilizados para predecir cómo se propagan las ondas acústicas en un medio acuoso. Para ello, se realizan diversas simulaciones en la herramienta de simulación Matlab para predecir dichos métodos de propagación y visualizar los resultados.

Se obtuvieron los siguientes resultados al adquirir los tres modelos de propagación, cada uno de los cuales tiene sus propias características y limitaciones a la hora de modelar la propagación del sonido en el agua:

La elección del modelo de propagación submarina depende de los objetivos específicos de la aplicación, en este caso para las simulaciones realizadas se consideró la profundidad como punto de análisis para estos modelos de propagación, esto con respecto a las pérdidas en un rango de 0dB a 200dB y distancias en un rango de 0 a 50Km tomando en cuenta las condiciones del medio acuático y los recursos computacionales disponibles para realizar estas simulaciones.

Es importante evaluar la precisión y desempeño de cada modelo en diferentes escenarios para seleccionar el más adecuado, de esta manera el resultado óptimo que se encontró es el modelo de propagación en aguas someras, el cual se consideró una profundidad de 100 metros a una distancia total de 2 km, Estos resultados son los más adecuados en comparación con el modelo de canal acústico profundo, el cual se consideró a una profundidad de 10 km a una distancia total de 50 km con pérdidas muy pronunciadas que serían muy deficientes para establecer una comunicación adecuada.

» VI. Conclusiones

- La selección de un modelo adecuado depende de las condiciones específicas de los parámetros y el entorno. No existe un modelo único que se adapte a todas las situaciones. Es importante seleccionar el modelo más adecuado teniendo en cuenta las exigencias del entorno y las propiedades del agua.
- Los modelos de propagación proporcionan un enfoque simplificado y conveniente para predecir la propagación del sonido en el agua. Son especialmente útiles cuando se trata de distancias cortas y geometrías sencillas. Sin embargo, no se tienen en cuenta efectos detallados como la absorción y la dispersión, por lo que pueden no ser adecuados para escenarios complejos.
- La validación y verificación de los modelos de propagación submarina son fundamentales para evaluar su precisión y rendimiento. Es importante comparar las predicciones del modelo con los datos medidos reales para garantizar que el modelo es fiable y proporciona resultados precisos. Además, el modelo debe ajustarse y calibrarse según sea necesario para adaptarlo a las características específicas de cada medio acuático.

» VII. Referencias

- [1] C. a. submarino, "examinar," 11 06 2022. [Online]. Available: <https://examinar.net/quien-es-acustica-submarina/>.
- [2] P. Córdoba González, "oa.upm," 26 05 2021. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/67257/#:~:text=El%20objetivo%20de%20este%20trabajo%20es%20el%20estudio,marino%20y%20un%20receptor%20cerca%20de%20la%20superficie..>
- [3] P. C. Etter, "Setting," in Underwater acoustic modeling, Boca raton, Taylor & Francis Group, 2018, pp. 1-2.
- [4] A. R. Pau, "defensa," 21 03 2022. [Online]. Available: <https://www.defensa.com/defensa-naval/sistema-comunicacion-acustica-submarina-permite-conexion-entre>.

- [5] S. e. práctico, 2019. [Online]. Available: <https://www.saberespractico.com/curiosidades/que-es-la-velocidad-del-sonido/>. [Accessed 28 06 2023].
- [6] Peralta Rodolfo y Piccolini Carlos, "Graduation Final Project to obtain the degree of Electronic Engineer.," RINFI, Mar de Plata, 2022.
- [7] F. Zapata, "Velocidad de sonido," 26 octubre 2019. [Online]. Available: <https://www.lifeder.com/velocidad-del-sonido/>. [Accessed 24 5 2023].
- [8] S. J. L. J. S. William Moebs, "Velocidad del sonido," in Física universitaria volumen 1 , R. UNIVERSITY, Ed., Houston, Texas 77005, OpenStax, 2021, pp. 866-868.
- [9] X. Lurton, "An introduction to underwater acoustics," 2010, p. Capitulo 2.
- [10] M. S. Arnedo, Velocidad del sonido, Universidad Carlos III de Madrid: MindTouch®.
- [11] J. M. Fiore, "Manual de Laboratorio - La Ciencia del Sonido," California.
- [12] Á. G. y. R. Domínguez, 2013. [Online]. Available: <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos13-2/ecuaciones-33-2.pdf>.
- [13] C. a. M. equation, "conectronica," 09 06 2010. [Online]. Available: <https://www.conectronica.com/tecnologia/investigacion/modelos-de-propagacion-de-senales-acusticas-en-entornos-subacuaticos-i>.
- [14] P. R. a. P. Carlos, "Generic speed profile," Mar de Plata, 2022.
- [15] T. S. y. T. T. M. Suzuki, Digital Acoustic Image Transmission System for Deep-Sea Research Submersible, M. t. O. Through, Ed., Newport: OCEANS' 92, 1992.
- [16] S. S. a. M. Zuffo, "La reflexión de la luz: especular y difusa," QUEHACER EDUCATIVO, p. 44, 2017.
- [17] J. Aparicio, " Study of channel models for underwater communications," Alcalá, Madrid.
- [18] A. K. y. S. Yauchi, "Sistema de comunicación acústica para robots submarinos," OCEANS' 89, 1989, pp. 765-770.
- [19] C. R. Guerra, "digital," [Online]. Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/4865/1/Ranz_RA.pdf. [Accessed 29 05 2023].
- [20] M. S. y. J. Mercer, Colossus Revisited: A Review and Extension of the Marsh-Schulkin Shallow Water Transmission Loss Model, University of Washington: APL-UW 8508, 1985.
- [21] A. D. D. y. A. H. Y. Fabiola. [Online]. Available: http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20070053_4488.pdf.
- [22] P. E. E. C. SUPERFICIAL, "tesis.ipn," [Online]. Available: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/17751>.
- [23] C. D. González, "Nuevos horizontes en la Detección Acústica Submarina," EJÉRCITOS, pp. 3-5, 2022.

