

# UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior. Departamento de Electrónica

Programa de Doctorado en Electrónica: Sistemas Electrónicos  
Avanzados. Sistemas Inteligentes



## MODELO DE PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

### **Autor**

Joaquín Aparicio Sosa

### **Directores**

Dra. Ana Jiménez Martín

Dr. Fernando Javier Álvarez Franco

### **Tesis Doctoral**

Alcalá de Henares, 2014



# Resumen

La presente tesis doctoral surge con el objetivo de realizar contribuciones en el ámbito del modelado de la propagación acústica en entornos subacuáticos, así como en los sistemas de posicionamiento en dichos entornos.

Los modelos de propagación son una herramienta clave para el estudio de sistemas que hacen uso de señales acústicas, como son por ejemplo los sistemas de posicionamiento acústico, debido a la dificultad que entraña la realización de pruebas experimentales en este medio. Estos modelos aportan por tanto información de gran valor sobre el funcionamiento de dichos sistemas bajo distintas condiciones del canal subacuático. En la actualidad, la gran mayoría de modelos de propagación existentes se encuentran limitados en su rango de aplicación, ya sea considerando únicamente cierto tipo de entornos, como los de aguas poco profundas, o utilizando un conjunto de ecuaciones que restringen su uso para entornos particulares. Adicionalmente, el código fuente de dichos modelos no está disponible generalmente para ser modificado, lo que justifica la necesidad de desarrollar un modelo propio.

Esta tesis aborda tres importantes aspectos en las temáticas mencionadas. En primer lugar se presenta un nuevo modelo de propagación acústica para entornos subacuáticos. Este modelo se basa en la técnica de trazado de rayos, que es la más indicada para señales acústicas que presenten cierto ancho de banda y superen los 200-500 Hz de frecuencia. En virtud de las ecuaciones consideradas para representar los distintos fenómenos físicos, el modelo es válido para un amplio rango de frecuencias, desde los 200 Hz hasta 1 MHz, y se puede usar para representar la propagación acústica en entornos diversos, desde aguas poco profundas a aguas profundas, así como aquellos en los que la profundidad depende de la distancia. Adicionalmente, el modelo contempla el efecto dinámico del oleaje generado por el viento como fuente de desvanecimiento y ensanchamiento Doppler en las señales reflejadas en la superficie del mar, siendo la inclusión de este efecto una novedad importante respecto a los modelos existentes.

En segundo lugar se abordan distintos análisis para estudiar el comportamiento de señales acústicas codificadas en entornos subacuáticos. La experiencia previa del grupo de investigación en sistemas de posicionamiento ultrasónico y en la propagación de ultrasonidos en aire ha permitido seleccionar dos esquemas de codificación que pueden ser adecuados en

estos entornos. Los estudios realizados utilizando estos esquemas han servido para analizar la influencia de distintos efectos del canal, como el desvanecimiento, multicamino y el efecto del ruido, en una señal codificada. Este estudio ha permitido por tanto seleccionar el mejor esquema de codificación entre los dos estudiados, según su comportamiento en este medio, así como identificar los principales fenómenos que provocan un error en la detección de estas señales codificadas, tanto cualitativa como cuantitativamente.

Finalmente, el modelo desarrollado se ha utilizado para el estudio de un sistema de posicionamiento acústico subacuático basado en señales GPS y señales acústicas codificadas para localizar un nodo sumergido, propuesto dentro de esta tesis. Este sistema presenta las ventajas de ser fácilmente desplegable y no necesitar una costosa fase de calibración, así como una mayor tolerancia al ruido y menor error en las detecciones de las señales acústicas que otros sistemas de similares características, gracias al uso de la codificación. Adicionalmente, se ha caracterizado el funcionamiento de dicho sistema para diversos algoritmos de posicionamiento, considerando los efectos de distintas configuraciones y fenomenología presente en el canal sobre la posición estimada del nodo sumergido.

En cumplimiento de la normativa regulada por el Real Decreto RD 99/2011 para la concesión de la mención de “Doctor Internacional”, en el apéndice C se encuentra una versión resumida de esta tesis en lengua inglesa, incluyendo el apartado de conclusiones.

# Abstract

The main goal of this PhD thesis is to make contributions to underwater acoustic propagation models, as well as to underwater positioning systems.

Underwater acoustic propagation models are crucial to study different systems that make use of acoustic technology, like acoustic positioning systems, due to the fact that performing experimental tests in this medium is a complex task. Propagation models provide very useful information about the performance of these systems under different underwater channel conditions. Nowadays, most propagation models are limited in their range of validity. This limitation is imposed because they only consider a certain kind of environments, such as shallow waters, or they model physical phenomena with equations that cannot be applied in all kind of environments. Additionally, the source code of these models is not usually available to be changed. Therefore, the development of a new propagation model is justified.

This PhD thesis can be divided into three main parts. In the first one, a new underwater acoustic propagation model is presented. This propagation model is based on the ray-tracing technique, which is the best one to represent the propagation of acoustic signals with frequencies over 200-500 Hz and a certain bandwidth. The proposed propagation model can be used for a wide range of acoustic frequencies, from 200 Hz to 1 MHz, by means of the set of equations considered to evaluate the different physical phenomena. It can be also used to study the acoustic propagation in all kind of scenarios, from shallow to deep waters, as well as scenarios with a variable depth with range. In addition, the propagation model considers the dynamic effect of wind-generated waves in the sea-surface reflected signals, which causes signal fading and Doppler spread. This effect is not included in the existing propagation models.

In the second part, several statistical analyses are performed to study the behavior of acoustic coded signals in underwater environments. The knowledge gathered through the last years by the research group on ultrasonic positioning systems and airborne sound propagation allowed choosing two coding schemes suitable for underwater environments. The influence of fading, multipath and noise on these coding schemes have been assessed by means of these statistical analyses. Therefore, these studies allowed to choose the best coding scheme among the ones considered, identifying which channel effects have a larger impact on the correct signal detection.

Finally, the developed propagation model has been used to study an underwater positioning system, which has been also proposed in this thesis. This positioning system is based on GPS and acoustic signals, and it is designed to locate a submerged node. The advantages of the proposed positioning system over already existing ones are the deployment facility and lack of calibration process, as well as a better detection of the acoustic signals and noise tolerance by means of signal coding. A characterization process has been performed for this positioning system considering several configurations and underwater channel effects, with different positioning algorithms.

In order to get the “International Doctor” mention, and following the regulations given by Real Decreto RD 99/2011, an extended abstract of this thesis written in English can be found in appendix C, which includes the conclusions section.

# Agradecimientos

Parecía que nunca iba a escribir estas líneas, pero finalmente todo llega. Y ha sido así gracias a muchas personas que han aportado su ayuda a lo largo de estos años. No es posible nombrar a todos, pero desde aquí les mando mi agradecimiento más sincero por su apoyo constante todo este tiempo, ya que han contribuido a que esta tesis salga adelante.

En primer lugar quiero darle un agradecimiento especial a mis directores de tesis, Ana Jiménez y Fernando Álvarez. Su ayuda, esfuerzo y dedicación han sido determinantes para que este trabajo vea finalmente la luz. A Fernando tengo que agradecerle que me encaminara para hacer una tesis doctoral cuando fui a hablar con él hace ya algunos años, recién terminada la carrera. Sin esa charla hoy no estaría aquí. Y a Ana el derroche de ánimos y su paciencia conmigo durante estos años, que estoy seguro no ha sido tarea fácil.

Quería extender este agradecimiento a Jesús Ureña. Aunque no haya sido director de esta tesis, su implicación parecía indicar lo contrario. Su interés en este trabajo y sus consejos han sido muy importantes y muy apreciados. Mis agradecimiento también para Daniel Ruiz y Carlos De Marziani, sin su ayuda en los temas de posicionamiento esta tesis habría durado bastante más.

También me gustaría hacer extensivo este agradecimiento a todos los compañeros del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, tanto profesores como PAS, por su ayuda a todos los niveles.

Por otro lado, me gustaría dar las gracias al personal de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, en especial a Hefeng Dong por la buena acogida durante mis meses en Trondheim. Mi agradecimiento también para Erlend y Lorenzo, por hacer que mi estancia allí fuera una gran experiencia.

Este agradecimiento me gustaría hacerlo extensivo al personal de la Universidad de Oporto. Muy especialmente a Nuno Cruz por su interés y su ayuda con mi trabajo, así como a Bruno, Rui y André por acogerme en Oporto. Espero que la tradición de los viernes de natas siga adelante.

Aunque no puedo nombrar a todos los compañeros con los que he compartido laboratorio estos años, sí me gustaría darles un agradecimiento muy especial a todos ellos. He tenido la suerte de compartir estos años con gente fantástica trabajando en el fondo 22, y compartir

muchos y buenos ratos con compañeros del fondo 21, el 31 o el Espacio Inteligente. Gracias por la ayuda con este trabajo, y también por los buenos ratos de café y de comida. Entre todos han conseguido que esta tesis sea más fácil de llevar. Gracias igualmente a mis compañeros del grupo Geintra por sus consejos y aguantar mis ecuaciones en las presentaciones.

Me mudé a Alcalá para realizar esta tesis, y ya son varios años viviendo aquí. La experiencia no hubiera sido tan satisfactoria si personas como Mari Carmen, Cristina, Óscar, Fran o Alfonso no me hubieran acogido prácticamente recién llegado. Mi agradecimiento más sincero para ellos, así como para los demás amigos que he ido conociendo aquí y que han conseguido que considere Alcalá como mi otro hogar. Me gustaría darles las gracias especialmente a Dani (nuevamente), César, Chema, Alfredo, Rodrigo, Fernando, Conchi y Laura, personas a las que he podido conocer por compartir laboratorio o charlas de café pero que ya no son únicamente compañeros de trabajo. Quería darles las gracias también a mis amigos de Badajoz, por acogerme siempre que voy con los brazos abiertos. Mi agradecimiento más especial para Juan, por el esfuerzo que ha dedicado en no perder el contacto durante todos estos años, aunque estuviera en mitad de los fiordos. Y también muchas gracias a Vanesa, Sandra y Amaya, por sus ánimos constantes durante este tramo final.

Por último, mi agradecimiento más especial va para mis padres, mi hermana y mi abuela. Gracias por creer en mi y apoyarme de todas las maneras posibles, y soportar estoicamente mis pocas visitas a Badajoz, o mi mal humor cuando el estrés me desbordaba. Sin vuestro apoyo constante durante tantos y tantos años este trabajo no habría sido posible.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Aplicaciones tecnológicas de señales acústicas en entornos subacuáticos: breve perspectiva histórica . . . . .	2
1.2. Entorno de desarrollo de la tesis . . . . .	4
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2. Estado de la cuestión y objetivos planteados</b>	<b>7</b>
2.1. Modelado de propagación acústica en entornos subacuáticos . . . . .	8
2.1.1. Trazado de rayos . . . . .	9
2.1.2. Modos normales . . . . .	15
2.1.3. Ecuación parabólica . . . . .	20
2.1.4. Expansión del multicamino . . . . .	24
2.1.5. Integración de número de onda . . . . .	25
2.2. Uso de señales codificadas en entornos subacuáticos . . . . .	28
2.3. Sistemas de posicionamiento en entornos subacuáticos . . . . .	32
2.3.1. Sistemas de posicionamiento acústico . . . . .	34
2.3.2. Sistemas de posicionamiento subacuático no acústicos . . . . .	38
2.3.3. Sistemas de posicionamiento basados en fusión de tecnologías . . . . .	40
2.4. Objetivos planteados . . . . .	44
<b>3. Estudio y modelado de la propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos</b>	<b>47</b>
3.1. Velocidad del sonido en el agua . . . . .	48
3.1.1. Canales de propagación debidos al perfil de velocidad del sonido . . . . .	57

3.2. Pérdidas de transmisión . . . . .	59
3.2.1. Divergencia geométrica . . . . .	61
3.2.2. Absorción . . . . .	63
3.2.3. Pérdidas por rebotes . . . . .	67
3.3. Efectos dinámicos en el canal subacuático . . . . .	72
3.4. Ruido ambiental . . . . .	76
3.5. Descripción del funcionamiento del modelo . . . . .	80
3.5.1. Implementación del trazado de rayos . . . . .	83
3.6. Conclusiones . . . . .	88
<b>4. Descripción del sistema de posicionamiento</b>	<b>91</b>
4.1. Despliegue y características del sistema . . . . .	92
4.1.1. Proceso de medida del sistema de posicionamiento . . . . .	95
4.2. Codificación de la señal acústica . . . . .	96
4.2.1. Conjuntos de secuencias complementarias . . . . .	100
4.2.2. Secuencias Kasami . . . . .	104
4.3. Adaptación de la señal codificada . . . . .	106
4.4. Algoritmos de posicionamiento estudiados . . . . .	109
4.4.1. Trilateración esférica mediante linealización . . . . .	110
4.4.2. Trilateración esférica por minimización de una función de coste . . .	111
4.4.3. Determinantes de Cayley-Menger . . . . .	113
4.4.4. Escalado métrico multidimensional . . . . .	114
4.4.5. Optimización por Levenberg-Marquardt . . . . .	116
4.5. Resumen . . . . .	117
<b>5. Resultados</b>	<b>119</b>
5.1. Validación del modelo de propagación . . . . .	120
5.1.1. Comparativa del modelo propuesto con BELLHOP . . . . .	120
5.1.2. Pruebas reales en entornos controlados . . . . .	125
5.1.3. Pruebas reales en entornos abiertos . . . . .	135
5.2. Comparativa de los esquemas de codificación estudiados: CSS y Kasami . .	137

5.3. Influencia del canal subacuático en la estimación de distancias mediante códigos Kasami . . . . .	141
5.3.1. Aguas poco profundas . . . . .	142
5.3.2. Canal superficial . . . . .	144
5.3.3. Canal acústico profundo . . . . .	147
5.4. Desempeño del sistema de posicionamiento propuesto . . . . .	149
5.4.1. Efecto de la incertidumbre en el sensor de presión . . . . .	152
5.4.2. Influencia de la profundidad del nodo sumergido . . . . .	153
5.4.3. Influencia del error en la estimación de distancias mediante señales acústicas y del número de nodos superficiales . . . . .	154
5.4.4. Efecto de la distancia entre nodos superficiales . . . . .	157
5.4.5. Influencia del GPS . . . . .	158
5.5. Conclusiones . . . . .	161
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>165</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	165
6.1.1. Desarrollo de un modelo de propagación acústica subacuática . . . . .	165
6.1.2. Estudio sobre la influencia del medio en señales codificadas . . . . .	166
6.1.3. Propuesta de sistema de posicionamiento basado en señales acústicas codificadas y GPS, y estudio de su funcionamiento . . . . .	168
6.2. Trabajo futuro . . . . .	169
6.3. Publicaciones derivadas de la tesis . . . . .	171
<b>Apéndice A. Otros efectos en la propagación acústica subacuática</b>	<b>175</b>
A.1. Reverberación . . . . .	175
A.2. Burbujas . . . . .	177
A.3. Ondas internas . . . . .	179
A.4. Zonas de sombra . . . . .	180
A.5. Cáusticas y zonas de convergencia . . . . .	180
A.6. Corrientes y remolinos . . . . .	181
<b>Apéndice B. Formulación de los algoritmos de posicionamiento</b>	<b>183</b>

B.1. Trilateración esférica mediante linealización . . . . .	183
B.2. Determinantes de Cayley-Menger . . . . .	186
B.3. Escalado métrico multidimensional . . . . .	188
<b>Apéndice C. Extended abstract and conclusions (English version)</b>	<b>193</b>
C.1. Introduction . . . . .	193
C.1.1. Motivation . . . . .	193
C.1.2. Background . . . . .	194
C.1.3. The aims of this thesis . . . . .	197
C.2. The underwater acoustic propagation model . . . . .	199
C.2.1. General description of the model . . . . .	199
C.2.2. Sound speed . . . . .	202
C.2.3. Transmission Loss . . . . .	203
C.2.4. Fading and Doppler spread caused by wind-generated waves . . . . .	204
C.2.5. Experimental validation of the propagation model . . . . .	205
C.3. Study of different coding schemes in underwater environments . . . . .	207
C.3.1. Comparison between CSS and Kasami codes . . . . .	207
C.3.2. Performance of Kasami codes in different underwater environments and channel conditions . . . . .	208
C.4. Proposal of an underwater positioning system based on data fusion . . . . .	211
C.4.1. Measurement process . . . . .	213
C.4.2. Brief description of the positioning algorithms studied . . . . .	214
C.4.3. Performance of the proposed positioning system . . . . .	216
C.5. Conclusions and future work . . . . .	218
C.5.1. Conclusions . . . . .	218
C.5.2. Future work . . . . .	221
C.5.3. International publications derived from this thesis . . . . .	222

# Índice de figuras

2.1. Modelo de Pekeris . . . . .	9
2.2. Desplazamiento de rayos al incidir en el fondo, considerado por Tindle y Bold [TB81] . . . . .	11
2.3. Aproximación de modos en cuña presentada en [PG91] . . . . .	19
2.4. Diferencia en la estimación del tiempo de vuelo en una señal recibida (a) mediante la detección de envolvente (b) . . . . .	29
2.5. Despliegue típico de un sistema LBL . . . . .	35
2.6. Despliegue típico de un sistema SBL . . . . .	37
2.7. Sistema de posicionamiento basado en boyas con GPS y transductores acústicos como el descrito en [You92] . . . . .	40
3.1. Comparativa de la velocidad del sonido calculada con las principales ecuaciones semiempíricas . . . . .	53
3.2. Perfil tipo de velocidad del sonido para latitudes medias y época estival . . . . .	56
3.3. Cambio de dirección del frente de ondas . . . . .	57
3.4. Propagación en un canal superficial . . . . .	58
3.5. Propagación en un canal acústico profundo . . . . .	60
3.6. Representación de la divergencia esférica . . . . .	61
3.7. Representación de la divergencia cilíndrica . . . . .	62
3.8. Comparativa del coeficiente de absorción obtenido por las principales ecuaciones semiempíricas . . . . .	66
3.9. Variación del coeficiente de Rayleigh con la frecuencia de la señal incidente para distintas alturas de olas ( $H_w$ ) y ángulos de incidencia rasante ( $\theta_s$ ) . . . . .	68
3.10. Variación de $TL_{sup}$ respecto a la frecuencia ( $f$ ), velocidad del viento ( $v_w$ ) y ángulo de incidencia ( $\theta$ ) . . . . .	70

3.11. Variación de $TL_{fon}$ respecto al ángulo de incidencia rasante $\theta_b$ , de acuerdo con la ecuación de Rayleigh (3.39) . . . . .	73
3.12. Variación del ensanchamiento Doppler con la frecuencia ( $f$ ) y el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) según (3.40) . . . . .	74
3.13. Nivel espectral genérico de ruido para entornos de aguas profundas [Uri83] .	79
3.14. Esquema de la simulación de una transmisión acústica en el modelo . . . . .	80
3.15. Diagrama de bloques del modelo . . . . .	82
3.16. Curvatura del rayo debido a la Ley de Snell . . . . .	83
3.17. Comparativa de tiempos de cómputo para distintos espesores de capa, profundidades y distancias . . . . .	84
3.18. Ángulos de incidencia para la reflexión en el fondo . . . . .	86
3.19. Perfil de velocidad del sonido (a) y trazado de rayos (b) para un entorno real en el fiordo de Trondheim, Noruega . . . . .	87
3.20. Identificación de llegadas en el receptor . . . . .	88
4.1. Despliegue del sistema de posicionamiento subacuático propuesto . . . . .	94
4.2. Diagrama que representa la obtención de los tiempos de vuelo en los distintos nodos del sistema . . . . .	97
4.3. Implementación de un filtro acoplado como un correlador digital . . . . .	99
4.4. Función de autocorrelación para un conjunto de secuencias complementarias	102
4.5. Función de correlación cruzada entre dos conjuntos de secuencias complementarias ortogonales . . . . .	102
4.6. Autocorrelación y correlación cruzada de una M-CSS de longitud 64 . . . . .	103
4.7. Autocorrelación y correlación cruzada para secuencias Kasami preferidas de longitud 63 . . . . .	106
4.8. Respuesta tipo en transmisión de un transductor ultrasónico . . . . .	107
4.9. Espectro de un código Kasami de 63 bits a 30 kHz, con varios ciclos de portadora . . . . .	108
4.10. Estimación de la posición por intersección de esferas . . . . .	111
4.11. Obtención de las coordenadas del punto $\mathbf{m}$ a partir de las distancias $r_1, r_2$ y $r_3$ a sendos puntos $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)$ de coordenadas conocidas. . . . .	113
5.1. Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría . . . . .	121

5.2. Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría . . . . .	122
5.3. Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría . . . . .	123
5.4. Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría . . . . .	123
5.5. Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría . . . . .	124
5.6. Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido variable y con batimetría . . . . .	125
5.7. Planos de propagación considerados para la validación del modelo en entornos controlados . . . . .	126
5.8. Dimensiones del entorno 1 . . . . .	128
5.9. Trazado de rayos en el entorno 1 . . . . .	128
5.10. Correlación obtenidas en el entorno 1 . . . . .	129
5.11. Valor absoluto de las señales de correlación para el entorno 1 . . . . .	130
5.12. Dimensiones del entorno 2 . . . . .	132
5.13. Trazado de rayos en el entorno 2 . . . . .	132
5.14. Modelo considerado para el patrón angular del emisor ProWave 200LM450	133
5.15. Correlaciones obtenidas en el entorno 2 . . . . .	134
5.16. Valor absoluto de las señales de correlación para el entorno 2 . . . . .	135
5.17. Tiempos de vuelo y pérdidas de transmisión obtenidas por el modelo, comparadas con datos reales obtenidos por Chitre [Chi07] . . . . .	136
5.18. Entorno tipo considerado para la comparativa de los códigos CSS y Kasami	138
5.19. Errores medios en la posición para cada nodo obtenidos por el algoritmo MDS140	
5.20. Configuración del emisor y receptor para el estudio de errores en la distancia mediante códigos Kasami . . . . .	142
5.21. Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en entornos de aguas poco profundas . . . . .	144
5.22. Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en entornos de aguas poco profundas . . . . .	145
5.23. Perfil de velocidad del sonido considerado para la estimación de distancias en un canal superficial . . . . .	145

5.24. Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en un canal superficial . . . . .	146
5.25. Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en un canal superficial . . . . .	147
5.26. Perfil de velocidad del sonido considerado para la estimación de distancias en presencia de un canal acústico profundo . . . . .	148
5.27. Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en presencia de un canal acústico profundo . . . . .	149
5.28. Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en presencia de un canal acústico profundo . . . . .	150
5.29. Despliegue de los nodos superficiales en el entorno . . . . .	151
5.30. CDF de la variación del error medio debido a la incertidumbre del sensor de presión para un caso favorable . . . . .	153
5.31. CDF de la variación del error medio con la profundidad del nodo sumergido	155
5.32. CDF de la variación del error medio con la estimación de distancia mediante señales acústicas para una separación de nodos superficiales de 50 m . . . .	156
5.33. CDF de la variación del error medio con la distancia entre nodos superficiales	158
5.34. Variación del error medio con la distancia para los algoritmos de Gauss-Newton y MDS, considerando cinco nodos superficiales . . . . .	159
5.35. CDF de la variación del error medio debido al GPS, considerando tres nodos superficiales separados 50 m . . . . .	160
5.36. Variación del error medio debido al GPS, usando tres nodos superficiales y una medida acústica desfavorable . . . . .	161
A.1. Efecto de las burbujas en la velocidad del sonido . . . . .	178
B.1. Obtención de la constante $w_j$ en las coordenadas baricéntricas generalizadas	187
C.1. Positioning system based on GPS and acoustic signals . . . . .	195
C.2. Block diagram of the propagation model . . . . .	200
C.3. Eigenpaths identification . . . . .	202
C.4. Pool dimensions and set up for the test . . . . .	205
C.5. Comparison of the model output with real data . . . . .	206
C.6. Average errors for different values of SNR and wind speed ( $w$ ) using: (a) CSS codes and (b) Kasami codes. Note the different scales used in both Y axes .	209



---

C.7. Mean errors for a shallow-water scenario . . . . .	210
C.8. Sound speed profile (a) and ray tracing (b) considered for the surface duct propagation . . . . .	211
C.9. Mean errors for a surface duct scenario . . . . .	212
C.10. Measurement process of the underwater positioning system . . . . .	214
C.11. Influence of the number of surface nodes . . . . .	218
C.12. Influence of the distance between three surface nodes . . . . .	219
C.13. Influence of the GPS error . . . . .	219



# Índice de tablas

2.1. Comparativa de las propiedades principales de las principales técnicas de modelado . . . . .	27
3.1. Rangos de validez de distintas ecuaciones para la velocidad del sonido en función de la temperatura ( $T$ ), presión ( $P$ ) y salinidad ( $S$ ) . . . . .	52
3.2. Coeficientes empíricos de la ecuación de Chen y Millero [Lab13] . . . . .	55
3.3. Rangos de validez de las distintas ecuaciones para el coeficiente de absorción	65
3.4. Propiedades de distintos materiales que componen el fondo marino [JKPS11]	72
5.1. Configuración para las pruebas en entornos controlados . . . . .	127
5.2. Tiempos de vuelo detectados para las señales real y sintética, en el entorno 1	131
5.3. Tiempos de vuelo detectados para las señales real y sintética en el entorno 2	134
5.4. Datos considerados en estudio comparativo de códigos CSS y Kasami . . . .	139
5.5. Datos considerados en el estudio de estimación de distancias mediante códigos Kasami . . . . .	142
5.6. Datos considerados en el estudio del funcionamiento del sistema de posicionamiento . . . . .	152
C.1. Comparison of the main properties of the different modeling techniques . .	197
C.2. Values considered in the statistical study of the positioning system performance	216



# Lista de símbolos

$\nabla$	Operador laplaciano.
$\alpha$	Coefficiente de absorción.
$\Delta_i$	Error absoluto en la medida $i$ .
$\gamma$	Índice adiabático.
$\mu_{acu}$	Error medio en la estimación de distancias mediante señales acústicas codificadas.
$\Phi$	Función potencial.
$\phi$	Función potencial independiente del tiempo.
$\phi_{x_i x_j}$	Correlación aperiódica de dos secuencias $x_i$ y $x_j$ .
$\rho$	Densidad instantánea.
$\rho_0$	Densidad de equilibrio.
$\sigma_{acu}$	Desviación típica en la estimación de distancias mediante señales acústicas codificadas.
$\sigma_{GPS}$	Desviación típica en la posición obtenida por un sensor GPS.
$\sigma_{Pres}$	Desviación típica en la profundidad obtenida por un sensor de presión.
$\theta$	Ángulo de incidencia en la superficie del mar.
$\theta_b$	Ángulo de incidencia rasante en el fondo del mar.
$\theta_s$	Ángulo de incidencia rasante en la superficie del mar.
$\omega$	Frecuencia angular.
$\mathcal{B}$	Módulo de compresibilidad adiabático.
$\mathcal{B}_T$	Módulo de compresibilidad isotérmico.

$\mathcal{P}$	Término de fase ( <i>eikonal</i> ).
$A$	Amplitud de la presión.
$B_D$	Ensanchamiento Doppler.
$c$	Velocidad del sonido en el agua.
$E_b$	Energía por bit.
$f$	Frecuencia de la onda acústica.
$f_s$	Frecuencia de muestreo de la señal.
$H_w$	Altura de la ola.
$I$	Intensidad acústica.
$N_0$	Densidad espectral de potencia de ruido.
$n(r, z), n(z)$	Índice de refracción del medio.
$P$	Presión ejercida por el fluido en un punto del medio.
$P_{ins}$	Presión instantánea.
$P_0$	Presión de equilibrio.
$p$	Presión acústica.
$pH$	pH del agua.
$R$	Parámetro de Rayleigh.
$r, d$	Distancia entre dos puntos.
$S$	Salinidad.
$s$	Condensación.
$T$	Temperatura.
$t_{TDV}$	Tiempo de vuelo.
$TL$	Pérdidas de transmisión total.
$TL_{geo}$	Pérdidas de transmisión por divergencia geométrica.
$TL_{abs}$	Pérdidas de transmisión por absorción.
$TL_{sup}$	Pérdidas de transmisión por rebotes en la superficie.
$TL_{fon}$	Pérdidas de transmisión por rebotes en el fondo.

$t$	Tiempo.
$t_{iS}$	Tiempo de ida y vuelta entre el nodo $i$ y $S$ .
$t_p$	Tiempo de proceso en la detección de un código.
$\vec{u}$	Velocidad de las partículas del medio.
$z$	Profundidad.
$z_e$	Profundidad del emisor.





# Lista de abreviaturas

<b>ADCP</b>	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> (Perfilador de corrientes acústico Doppler).
<b>ASV</b>	<i>Autonomous Surface Vehicle</i> (Vehículo autónomo de superficie).
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase-Shift keying</i> (Modulación binaria por desplazamiento de fase).
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de código).
<b>CTD</b>	<i>Conductivity-Temperature-Depth</i> (Sensor de conductividad-temperatura-profundidad).
<b>DSSS</b>	<i>Direct-Sequence Spread-Spectrum</i> (Espectro ensanchado por secuencia directa).
<b>DVL</b>	<i>Doppler Velocity Log</i> (Registrador de velocidad Doppler).
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de frecuencia).
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada rápida de Fourier).
<b>FFP</b>	<i>Fast Field Programs</i> (Modelos <i>fast field</i> ).
<b>FPGA</b>	<i>Field Programmable Gate Array</i> .
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de posicionamiento global).
<b>IMU</b>	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidad de medición inercial).
<b>INS</b>	<i>Inertial Navigation System</i> (Sistema de navegación inercial).
<b>ISI</b>	<i>Inter-symbol Interference</i> (Interferencia entre símbolos).
<b>LBL</b>	<i>Long baseline</i> (Muy larga base).
<b>MAI</b>	<i>Multiple Access Interference</i> (Interferencia por acceso múltiple).

<b>MDS</b>	<i>Multi-Dimensional Scaling</i> (Escalado multidimensional).
<b>PPC</b>	<i>Passive Phase Conjugation</i> (Conjugación de fase pasiva).
<b>PPS</b>	<i>Pulse Per Second</i> (Pulso por segundo).
<b>RF</b>	(Radiofrecuencia).
<b>ROV</b>	<i>Remotely Operated Vehicles</i> (Vehículos operados remotamente).
<b>SBL</b>	<i>Short baseline</i> (De base corta).
<b>SLAM</b>	<i>Simultaneous Localization And Mapping</i> (Localización y mapeado simultáneos).
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relación señal a ruido).
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de tiempo).
<b>TL</b>	<i>Transmission loss</i> (Pérdidas de transmisión).
<b>USBL</b>	<i>Ultra-short baseline</i> (De base ultra corta).

# Capítulo 1

## Introducción

El desarrollo de sistemas de posicionamiento para entornos subacuáticos ha experimentado un auge importante en las dos últimas décadas. Estos sistemas se utilizan fundamentalmente para posicionar nodos en una red de sensores, que pueden estar situados tanto en la superficie del mar como debajo del agua, como es el caso de los vehículos subacuáticos autónomos (*Autonomous Underwater Vehicles*, AUV) o los vehículos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles*, ROV).

El posicionamiento de nodos en la superficie del mar es un problema que se soluciona comúnmente gracias al uso de la tecnología GPS (*Global Positioning System*). Esta tecnología presenta la ventaja de ser ampliamente conocida y utilizada en la actualidad, pero por el contrario impone una restricción basada en la dependencia con una tecnología externa, requiriendo además disponer de buena cobertura, que puede estar limitada en ciertas regiones. Adicionalmente, en entornos subacuáticos no es viable posicionar nodos sumergidos directamente mediante GPS, puesto que estas señales no se propagan debajo del agua más allá de unos pocos metros. En estas condiciones, las señales acústicas son la solución más empleada y versátil para transmitir la información necesaria, gracias a que presentan las mejores propiedades de propagación en estos entornos.

En esta tesis se presenta un nuevo sistema de posicionamiento para entornos subacuáticos basado en el uso de señales GPS para posicionar una serie de nodos superficiales, y de señales acústicas codificadas para localizar un nodo sumergido. Dadas las características de este sistema, podría ser desplegado y funcionar de la manera más sencilla posible y con un coste reducido en todo tipo de entornos, pudiéndose aplicar para el posicionamiento de nodos en redes de sensores, el seguimiento de objetos o la ayuda a la navegación de vehículos autónomos.

Para estudiar el funcionamiento de este sistema se ha desarrollado en esta tesis un modelo de propagación acústica subacuática. Este modelo tiene en cuenta los principales fenómenos del medio, lo que permite replicar la propagación acústica de una manera lo más realista posible. De este modo, podrá estudiarse la influencia de los distintos efectos del

canal subacuático sobre los sistemas que en él operen, como es el sistema de posicionamiento propuesto.

## 1.1. Aplicaciones tecnológicas de señales acústicas en entornos subacuáticos: breve perspectiva histórica

A lo largo de las últimas décadas el uso de tecnologías acústicas en entornos subacuáticos ha cobrado una especial importancia, debido a la necesidad de monitorizar sensores medioambientales, controlar o recabar información de vehículos sumergidos, al uso del sónar, o más recientemente, a la aparición de sistemas de posicionamiento subacuático. Las señales acústicas son las que presentan mejores propiedades en este tipo de entornos, debido a que las ondas electromagnéticas sufren de una gran atenuación en el agua: a una frecuencia de 30 kHz la absorción es del orden del  $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ , mientras que para una onda acústica de la misma frecuencia, es de  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ .

A pesar de que es en las últimas décadas cuando ha crecido considerablemente el uso de señales acústicas en entornos subacuáticos, esta tecnología cuenta con una amplia historia a lo largo de los últimos siglos. Se podría considerar que el precursor de las investigaciones sobre propagación acústica en agua fue Leonardo da Vinci, que sentó las bases en el siglo XV para el uso de un rudimentario sónar pasivo. La idea de da Vinci era que un observador situado en un barco en el mar, estando el barco en reposo para minimizar el ruido del propio barco, podría utilizar un tubo lo suficientemente largo sumergido en el agua para escuchar el ruido provocado por barcos distantes.

El siguiente hecho relevante tuvo lugar siglos más tarde, en 1827. Ese año el físico Daniel Colladon y el matemático Charles François Sturm midieron la velocidad del sonido en el agua mediante un experimento realizado en el lago Lemán. En dicho experimento generaron dos señales simultáneas, consistentes en un destello luminoso y el sonido de una campana sumergida, y observaron el intervalo de tiempo entre la detección de ambas recepciones. Gracias a este experimento se estimó que el valor de la velocidad del sonido en agua, estando ésta a una temperatura de  $8^{\circ}\text{C}$ , era de  $1435 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , un valor muy cercano al que se obtendría en la actualidad con mejores medios.

En el siglo XIX se produjeron dos avances en otros campos científicos que repercutieron en la posterior investigación en entornos subacuáticos: en 1840 James Joule descubre el efecto de magnetostricción, y en 1880 Pierre y Jacques Curie descubren el efecto piezoeléctrico. Estos efectos permiten generar ondas acústicas de un contenido espectral específico. La primera aplicación del efecto piezoeléctrico relacionada con entornos subacuáticos tuvo lugar durante la Primera Guerra Mundial, cuando Paul Langevin ideó un sistema de detección de submarinos mediante un sencillo proceso de las ondas acústicas y sus ecos.

En 1919 H. Lichte publica el que se considera el primer artículo de investigación sobre acústica subacuática. En dicho artículo se estudiaba la influencia de capas horizontales de distinta temperatura en la propagación de las ondas acústicas, e inició por tanto el estudio para modelar la propagación de ondas acústicas en estos entornos.

Los primeros avances importantes en sistemas experimentales llegarían con la Segunda Guerra Mundial. En 1945 se desarrolló uno de los primeros sistemas de comunicaciones subacuáticas, enfocado al uso en submarinos, que permitía comunicarlos estando separados varios kilómetros de distancia. El posterior desarrollo de la tecnología VLSI (*Very-Large-Scale Integration*) en circuitos integrados y la aparición de los DSP (*Digital Signal Processor*) permitió experimentar con distintos tipos de modulaciones, ecualizaciones y algoritmos de corrección de errores, gracias a los cuales se mejoró el rendimiento de este tipo de sistemas.

Existen diferentes aplicaciones basadas en el uso de señales acústicas en entornos subacuáticos, enfocadas a sistemas muy diferentes, apreciándose lo polivalentes que son estas señales en este entorno. Entre todas estas aplicaciones caben destacar las siguientes:

- *Sónar*: fueron de los primeros sistemas en desarrollarse, inicialmente para detectar submarinos. Su uso a día de hoy se ha extendido más allá del militar, empleándose para inspeccionar el fondo marino o para detectar bancos de peces para su posterior pesca.
- *Sistemas de comunicaciones*: este tipo de sistemas se desarrollaron especialmente durante la Segunda Guerra Mundial, con el fin de conseguir comunicaciones entre submarinos. Posteriormente se generalizaron estos sistemas y se comenzaron a implementar procesos de ecualización y corrección de errores, permitiendo en la actualidad la transmisión de imágenes y vídeo entre dos puntos.
- *Redes de sensores subacuáticos*: los cables limitan la versatilidad de las redes de sensores, por lo que el uso de señales acústicas es la solución más común para transmitir datos entre los distintos nodos, especialmente los que están sumergidos a cierta profundidad. Las redes de sensores están ganando un interés creciente en los últimos años, gracias a la importancia de monitorizar diversos parámetros medioambientales en el océano, aviso de tsunamis o asistencia en la navegación.
- *Estimación de las condiciones climatológicas*: la lluvia provoca un patrón de ruido muy característico, que depende del tamaño de las gotas. Se puede conocer por tanto la precipitación en una determinada zona del mar realizando un análisis espectral del ruido ambiental en distintos intervalos de tiempo. Un estudio similar se puede realizar para la velocidad del viento en superficie, ya que existe una relación entre el nivel de ruido generado en una determinada región espectral y la velocidad del viento en superficie.

- *Detección de objetos mediante el ruido*: esta técnica, conocida en inglés como *acoustic daylight*, permite detectar un objeto mediante el reflejo del ruido acústico ambiental, que es el ruido que está siempre presente en el medio. Sería el análogo acústico de la visión gracias a la reflexión de la luz en un objeto, siendo por tanto un proceso diferente al sónar activo o pasivo.
- *Estudio de las características del fondo marino*: las señales acústicas se emplean también para estudiar las propiedades de las capas de sedimentos depositadas en el fondo del mar, gracias a la información obtenida en la señal reflejada y al uso de diversos modelos físicos para caracterizar el fondo, como el de Biot. Los parámetros característicos del fondo marino se pueden obtener también por técnicas como la inversión geoacústica (*Geoacoustic Inversion*), donde se varían los valores de entrada que describen el fondo en los modelos. Estos datos se comparan con los reales, obteniendo así las características reales del fondo comparando ambos valores y seleccionando aquellos cuya simulación se ajuste mejor al caso real.
- *Sistemas de posicionamiento subacuático*: este tipo de sistemas están experimentando un interés creciente en los últimos años. Ante la imposibilidad de usar señales GPS debajo de la superficie del mar y la dificultad de emplear señales electromagnéticas en estos entornos, se utilizan señales acústicas para obtener la posición de objetos sumergidos. Conocer la posición de un nodo proporciona una valiosa información adicional en diversas aplicaciones, como la distribución de nodos en una red de sensores, o la ubicación de un vehículo sumergido o cualquier otro objeto, pudiendo facilitar así la tarea de su localización y recuperación.

Como ya se ha comentado anteriormente, el trabajo que se ha desarrollado en esta tesis está relacionado con la aplicación descrita en último lugar, así como en el desarrollo de un modelo de propagación acústica para estos entornos. El sistema de posicionamiento que aquí se presenta supone un nuevo paso en la evolución de dichos sistemas con nuevos retos a resolver, tal y como se pondrá de manifiesto a lo largo de la tesis. Por su parte, el modelo desarrollado presenta una gran versatilidad, pudiéndose aplicar en multitud de entornos y rangos de frecuencia, y obteniendo resultados que muestran buen acuerdo con pruebas reales.

## 1.2. Entorno de desarrollo de la tesis

El desarrollo de esta tesis ha ido asociado al interés de la empresa *GCM Communications Technology* y al proyecto LEMUR (referencia TIN2009-14114-C04-01/04), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, que ha tenido su continuación en el proyecto LORIS (referencia TIN2012-38080-C04-01/02), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Entre otros factores, el inicio de esta tesis tuvo lugar gracias al interés en las comunicaciones subacuáticas mostrado por la empresa GCM. Este interés se vio reflejado en una beca de posgrado entre la universidad y dicha empresa, durante la cual se realizó un estudio del estado del arte en comunicaciones subacuáticas y se inició el modelado de propagación de señales acústicas en dichos entornos. Estos trabajos constituyeron el inicio de la presente tesis.

El proyecto LEMUR, desarrollado conjuntamente con el Instituto de Automática Industrial del CSIC, la Universidad de Valladolid y la Universidad de Extremadura durante los años 2010 a 2012, tuvo como objetivo principal avanzar en el desarrollo de sistemas de posicionamiento local en entornos extensos mediante la combinación de técnicas ultrasónicas y de radiofrecuencia. A pesar de que el proyecto estaba enfocado para sistemas en aire, las técnicas de posicionamiento estudiadas fueron de utilidad para el posterior desarrollo del sistema de posicionamiento subacuático que se presenta en este trabajo, así como de las técnicas de modulación y codificación estudiadas, tal y como se verá con mayor detalle en los próximos capítulos.

Otro de los objetivos del proyecto era el modelado de propagación de señales ultrasónicas y de radiofrecuencia, tanto para entornos interiores como exteriores. La ampliación de este estudio al medio subacuático siempre estuvo presente, al presentar gran similitud con el estudio de la propagación acústica en entornos exteriores. Este interés en ampliar el estudio al medio subacuático se ha reflejado en las líneas de investigación del proyecto LORIS.

El trabajo desarrollado en la presente tesis supone por tanto la apertura de una nueva línea de investigación en el grupo, adaptando el conocimiento de sistemas en aire a las peculiaridades del medio subacuático. El trabajo desarrollado en esta tesis tanto en lo que respecta al modelado de la propagación acústica como al estudio de sistemas de posicionamiento subacuático permitirá sentar las bases para futuros trabajos del grupo en este campo.

Por último, desde un punto de vista económico, esta tesis ha tenido otras fuentes de financiación, como ha sido la Universidad de Alcalá, a través del programa de ayudas de Formación de Personal Investigador (FPI) y del programa de ayudas de movilidad, que financió la estancia realizada en 2012 en el Grupo de Sistemas Oceánicos de la Universidad de Oporto. El Departamento de Electrónica también colaboró económicamente en el desarrollo de esta tesis, subvencionando conjuntamente con la Universidad de Alcalá la estancia realizada en 2011 en el Grupo de Acústica de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (*Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet*, NTNU). Ambas estancias han sido esenciales para el desarrollo de esta tesis.

### 1.3. Estructura de la tesis

La redacción de esta tesis se ha estructurado en seis capítulos atendiendo a los diferentes temas que han sido abordados en el desarrollo de la misma. Así, después de esta introducción, en el capítulo 2 se presenta una revisión de los trabajos más relevantes relacionados con el modelado de la propagación de señales acústicas en entornos subacuáticos, la codificación de estas señales mediante técnicas CDMA (*Code Division Multiple Access*) y el desarrollo de sistemas de posicionamiento en estos entornos.

En el capítulo 3 se realiza un análisis detallado de la fenomenología presente en la propagación de señales acústicas en el agua, basado en el estudio de los principales trabajos publicados en propagación acústica desde mediados del siglo pasado. Igualmente, en este capítulo se presenta la implementación de los efectos considerados como fundamentales en el modelo de propagación desarrollado.

En el capítulo 4 se describe el sistema de posicionamiento subacuático propuesto en las distintas facetas que lo componen: se detalla el proceso de medida, se proponen distintas alternativas para la codificación de la señal acústica y se revisan los algoritmos de posicionamiento estudiados.

El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos en esta tesis, tanto en lo que respecta al modelo de propagación desarrollado, como al sistema de posicionamiento propuesto. Este capítulo se ha dividido en tres bloques claramente diferenciados. La primera parte del capítulo detalla la validación del modelo de propagación desarrollado mediante comparativas con otro modelo y pruebas reales. La segunda parte del capítulo aborda una comparativa de los esquemas de codificación estudiados y un estudio de la influencia del canal en la correcta detección de señales acústicas codificadas. Finalmente, en la tercera y última parte del capítulo se muestran los resultados obtenidos con los distintos algoritmos de posicionamiento estudiados para distintas configuraciones del sistema y errores de entrada.

Por último, en el capítulo 6 se discuten las conclusiones finales, las principales aportaciones realizadas y se indican las futuras líneas de investigación que podrían derivarse del trabajo presentado.



## Capítulo 2

# Estado de la cuestión y objetivos planteados

El medio subacuático es un entorno complejo y difícil en el que trabajar. El desarrollo de cualquier sistema acústico que deba funcionar en este medio se ve favorecido en gran medida por un estudio concienzudo de la fenomenología física presente en él, de manera que se pueda comprender qué afecta a la propagación de las ondas acústicas y cómo. Estos estudios se ven reflejados en el desarrollo de distintos modelos de propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos. La primera sección de este capítulo se ocupa por tanto de presentar las diferentes herramientas matemáticas y modelos existentes basados en ellas.

Una de las técnicas más comunes cuando se trabaja con sistemas de posicionamiento, así como en otros sistemas en los que se pretende obtener con una mayor exactitud la distancia entre dos nodos, consiste en codificar la señal emitida con una secuencia pseudoaleatoria. De esta forma se pueden obtener los tiempos de vuelo mediante procesos de correlación, aportando además cierta inmunidad frente al ruido. La siguiente sección de este capítulo revisará los trabajos más relevantes que han empleado señales codificadas, con especial énfasis en los que las han empleado en entornos subacuáticos.

Por su parte, el campo de los sistemas de posicionamiento subacuático comenzó a explorarse de manera más intensa en la década de los 90, y hoy día sigue experimentando nuevos avances y técnicas que logren mejorar la exactitud de los resultados obtenidos. En la tercera sección se revisan los distintos enfoques existentes en los que se basan estos sistemas de posicionamiento, mostrando los trabajos más relevantes para cada caso. Finalmente, la última sección presenta una descripción detallada de los objetivos planteados en esta tesis.

## 2.1. Modelado de propagación acústica en entornos subacuáticos

El objetivo principal de los modelos de propagación acústica subacuática, es obtener una visión general de la propagación en un entorno determinado y bajo unas condiciones específicas. De esta manera, cambiando dichas condiciones se puede predecir cómo van a afectar al funcionamiento del sistema ciertas propiedades del medio. Aunque este comportamiento se podría inferir realizando diversos ensayos en entornos reales, dada la complejidad que tiene realizar pruebas en entornos subacuáticos, tanto en coste como en tiempo, el uso de modelos de propagación está muy extendido desde hace décadas.

El interés por el modelado de la propagación acústica subacuática surge principalmente en el contexto de la Segunda Guerra Mundial, con la intención de predecir el comportamiento de un sónar para detectar submarinos. Todos los modelos de propagación parten del mismo punto, la ecuación de ondas (2.1), que proporciona la relación entre una función potencial  $\Phi$  con la posición, en función del tiempo  $t$  y la velocidad del sonido en agua,  $c$  [Ett03]:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Si para esta ecuación se asume una solución armónica del tipo  $\Phi = \phi \cdot e^{-i\omega t}$ , donde  $\phi$  es la función potencial independiente del tiempo y  $\omega$  es la frecuencia angular, la ecuación (2.1) puede simplificarse y se obtiene la ecuación de Helmholtz (2.2):

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (2.2)$$

donde  $k$  es el número de onda. Existen diferentes formas de abordar esta ecuación, siendo la más directa la aplicación de técnicas matemáticas como diferencia finita (*finite-difference*) [CS92] o elementos de contorno (*boundary element*) [GPS98] a esta ecuación diferencial. Sin embargo y dada la gran exigencia computacional que requieren estos métodos directos, los primeros modelos que comenzaron a utilizarse e incluso la gran mayoría de modelos actuales, emplean una o varias simplificaciones a esta ecuación antes de resolverla.

Los primeros modelos surgieron en la década de los 40, gracias en gran parte al estudio de Pekeris de los modos normales de la ecuación de onda para explicar la propagación de fuentes explosivas de sonido en entornos de aguas poco profundas (se consideran aguas poco profundas a aquellas regiones cuya profundidad no supera los 100-150 metros, aunque es una cantidad orientativa) [Ett03]. Pekeris además propuso una versión simplificada del entorno, consistente en una columna de agua sobre un fondo plano considerado como un fluido semi-infinito, tal y como se muestra en la figura 2.1. Esta descripción del entorno se conoce como modelo de Pekeris, y ha sido utilizada para describir numerosos modelos de distintas técnicas. En la figura 2.1 se ha definido también el eje de distancias y el eje de profundidad, que formará el sistema de referencia habitual en estos entornos.

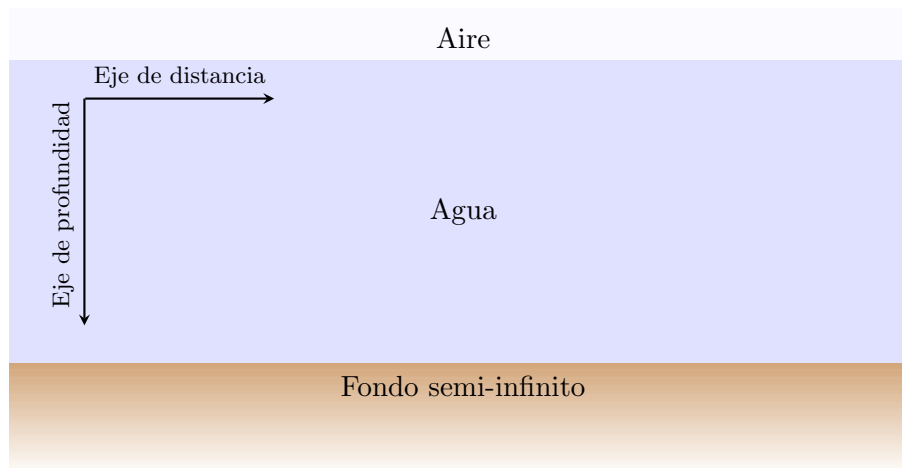


Figura 2.1: Modelo de Pekeris

Originalmente, estos modelos se podían clasificar en dos grandes grupos: trazado de rayos y soluciones ondulatorias. Con el desarrollo que tuvo lugar en este campo en las sucesivas décadas y aunque en esencia la clasificación sigue siendo correcta, actualmente es más habitual realizar una clasificación más amplia de los modelos de propagación. Así, Etter los clasifica en cinco grandes grupos [Ett03]: trazado de rayos, modos normales, ecuación parabólica, expansión del multicamino y *fast-field*. Cada uno de estos modelos permite estudiar la propagación acústica para unas condiciones específicas, generalmente referentes al entorno y a las aproximaciones consideradas para resolver la ecuación de ondas. Debido a estas limitaciones, no existe ningún modelo que pueda ser utilizado con carácter general para todos los casos, es decir, no existe lo que se podría denominar un modelo estandarizado de propagación acústica subacuática.

En este trabajo se ha decidido seguir la clasificación de Etter por su claridad, cambiando únicamente los modelos *fast-field* por los de integración de número de onda, que son más genéricos y engloban a los anteriores. Para cada uno de estos grupos se describirán brevemente las bases teóricas y se repasarán las contribuciones más importantes, obteniendo así una visión global de los parámetros fundamentales a considerar en estos entornos. Adicionalmente, se podrán apreciar los distintos avances en las técnicas de modelado a través de las últimas décadas, y la importancia de los modelos de propagación en el estudio de sistemas diversos en entornos subacuáticos.

### 2.1.1. Trazado de rayos

La teoría de rayos proporciona una solución fácilmente interpretable de la propagación acústica desde un punto de vista físico, siendo además uno de los modelos que se lleva utilizando más tiempo en entornos subacuáticos. Esta técnica se empleaba de forma más general en campos como la óptica, y fue a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando

comenzó a utilizarse en acústica. En 1949 comenzó a popularizarse su uso en este campo debido a la publicación de un libro titulado “*Physics of Sound in the Sea*” [Com49], publicado por el Comité de Investigación para la Defensa Nacional (*National Defense Research Committee*), que recopilaba documentos teóricos de principios de la década. A su popularización también contribuyeron los trabajos posteriores de Lewis y Keller [LK64], Ludwig [Lud66] y Weinberg [Wei75].

En este modelo se busca una solución a la ecuación (2.2) en forma de onda armónica, donde la función potencial independiente del tiempo es la amplitud de la presión ( $A$ ), y al término de la fase ( $\mathcal{P}$ ) se le conoce como *eikonal*. Utilizando esta solución en la ecuación (2.2), y separando la parte real e imaginaria, se obtienen las ecuaciones siguientes [Ett03]:

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A - [\nabla \mathcal{P}]^2 + k^2 = 0 \quad (2.3)$$

$$2 \cdot [\nabla A \cdot \nabla \mathcal{P}] + A \nabla^2 \mathcal{P} = 0 \quad (2.4)$$

donde la ecuación (2.3) define la geometría de los rayos, y la ecuación (2.4) define la amplitud de estos. Asumiendo que la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varían apreciablemente en una longitud de onda, la ecuación (2.3) se puede aproximar como (2.5) [Ett03]

$$[\nabla \mathcal{P}]^2 = k^2 \quad (2.5)$$

que se conoce como la ecuación de la *eikonal*. Esta ecuación se soluciona introduciendo una familia de curvas, que son los rayos, que se definen perpendiculares a las curvas de nivel de la fase, es decir, a los frentes de onda [Por93]. Por lo tanto, en los modelos de trazado de rayos se considera que la energía de la onda se encuentra confinada en distintos caminos o rayos, de manera que la propagación de las ondas acústicas en el medio se puede considerar equivalente al camino trazado por diversos rayos, donde estos representan la perpendicular del frente de ondas.

Dada la aproximación realizada, esta suposición es correcta siempre y cuando la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varíen apreciablemente en una distancia de una longitud de onda, tal y como se ha indicado anteriormente, y por tanto esta teoría funciona mejor a medida que aumenta la frecuencia de la señal emitida. Aunque no existe un umbral estandarizado por debajo del cual no sea aconsejable emplear modelos de trazado de rayos, generalmente se considera que no es recomendable utilizar esta teoría para frecuencias inferiores a 500 Hz [Ett03]. No obstante, en el estudio bibliográfico que se incluye a continuación se documentan diversos trabajos donde se han realizado pruebas con algunos modelos a frecuencias menores obteniendo buenos resultados, según los resultados ofrecidas.

Este tipo de modelos son generalmente rápidos en lo que respecta a tiempos de cómputo, permiten seleccionar la directividad de la fuente y pueden trabajar en entornos en los que la velocidad del sonido depende de la distancia y la profundidad. Además, permiten también trabajar con medios cuya profundidad depende de la distancia (batimetría), y pueden ser

usados para tratar problemas de señales de cierto ancho de banda de manera eficiente. Sin embargo, no consideran efectos de difracción y presentan problemas en su formulación con la formación de puntos singulares (cáusticas) y zonas de sombra [Buc92].

Una de las primeras mejoras más relevantes a la teoría de trazado de rayos la realizan Tindle y Bold [TB81]. En este artículo se presenta una modificación al trazado de rayos clásico para incluir el desplazamiento geométrico de estos caminos al incidir en el fondo, resultando en un proceso de reflexión especular pero con puntos diferentes para el rayo incidente y el reflejado, tal y como representa la figura 2.2.

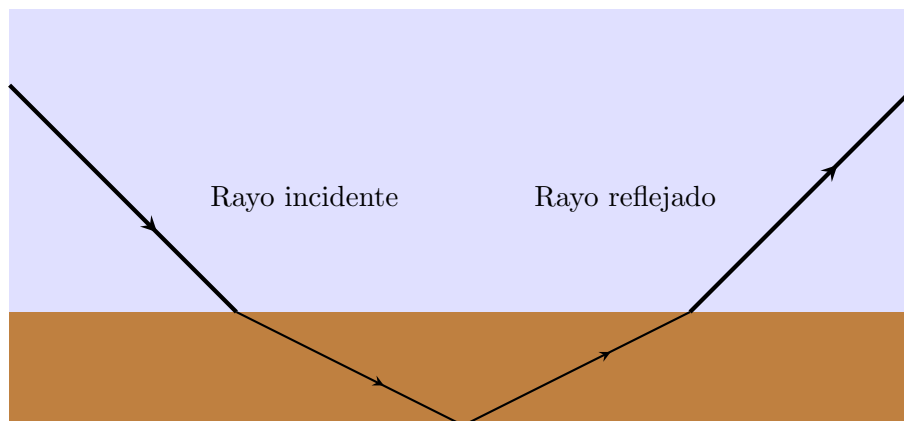


Figura 2.2: Desplazamiento de rayos al incidir en el fondo, considerado por Tindle y Bold [TB81]

El modelo se aplica al entorno descrito por Pekeris, que hasta la fecha había sido modelado principalmente con la teoría de modos normales, calculando de forma geométrica los parámetros característicos de un modelo de trazado de rayos, como los tiempos de llegada, energía perdida por divergencia geométrica o las fases de las señales recibidas. El modelo se compara con datos experimentales y un modelo de modos normales, mostrando buen acuerdo con ambos para bajas frecuencias (140 Hz). En un trabajo posterior se extiende el modelo para incluir fondos con pendientes en línea recta [TD85].

Un estudio similar utilizando desplazamiento de rayos lo presentan Siegmann, Jacobson y Law [SJM87] para estudiar el efecto en la propagación de dos tipos diferentes de modelos de interacción con el fondo oceánico: el de Rayleigh, que no incluye atenuación, y el de Mackenzie, que sí la considera. Nuevamente, asumiendo un modelo de Pekeris para el canal y estudiando cómo el desplazamiento de rayos se ve afectado por uno u otro modelo para el fondo, demuestran que el número de rayos y sus propiedades varían y pueden provocar resultados diferentes, aunque no se comparan los resultados con pruebas experimentales.

Otra mejora significativa se produjo con la consideración de haces de rayos. En 1987 Porter y Bucker presentan el algoritmo BELLHOP [PB87], que utiliza haces Gaussianos y es uno de los modelos basados en trazado de rayos más conocidos y empleados. Este método asocia a cada rayo un haz centrado en el mismo rayo, de una anchura determinada y con una intensidad de energía que sigue una distribución Gaussiana. Para ello se añaden dos

ecuaciones diferenciales más al conjunto de ecuaciones clásicas, que describen la anchura y la curvatura del haz. Con este método se evitan los problemas de cáusticas y zonas de sombra que aparecen en los modelos clásicos de trazado de rayos. Los resultados se comparan con un trazado de rayos clásico y un modelo de modos normales para distintos perfiles de velocidad del sonido.

Basándose en este modelo, Bucker presenta en 1994 las bases de otro modelo de haces Gaussianos tridimensional, que es válido para entornos de aguas poco profundas [Buc94]. Por su parte, Porter y Liu presentan otra versión del modelo que no utiliza haces Gaussianos y permite obtener una solución más parecida a los resultados teóricos de la teoría de rayos [PL94], es decir, la solución sin efectuar las aproximaciones típicas que se realizan en los modelos. La última versión de BELLHOP data de 2011 y permite seleccionar entre haces Gaussianos y rayos geométricos, así como seleccionar perfiles de batimetría y considerar una velocidad del sonido dependiente de la distancia, y no únicamente de la profundidad. Su documentación se puede consultar en [Por11] .

Aunque la inclusión de haces Gaussianos y el desplazamiento geométrico de rayos se pueden considerar las dos contribuciones principales a la mejora del trazado de rayos clásico, existen numerosos estudios que siguen utilizando la visión clásica del problema para obtener su propio modelo, mostrando así que incluso la aproximación básica proporciona buenos resultados para una gran cantidad de problemas a estudiar.

Un ejemplo de estos modelos sería RAY [BSDF92], desarrollado en el Instituto Oceanográfico de Woods Hole (WHOI, *Woods Hole Oceanographic Institution*). Este modelo está especialmente diseñado para propagaciones a muy larga distancia, ya que además de tener en cuenta la batimetría y la velocidad del sonido también incorpora el efecto de la curvatura de la Tierra en las ecuaciones de posición de los rayos. Por otra parte, según los métodos utilizados para interpolar los distintos perfiles dependientes de la distancia, se consigue suavizar el frente de onda y por tanto reducir en cierta medida el problema de las cáusticas. No obstante, no se proporciona información sobre si se incorporan pérdidas de transmisión en el modelo, y de qué tipo.

Siguiendo los pasos de este modelo, el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington (*Applied Physics Laboratory, APL*) presentó el suyo [DJ98], basado en la misma idea pero cambiando el lenguaje de programación de C a Fortran. Además incorporaron subrutinas de la *Numerical Recipes* disponibles para esta plataforma, como el método de integración para las ecuaciones de los rayos. La intención era que el código fuese lo más flexible posible, para que pudiera ser fácilmente personalizable por otros usuarios.

Zielinski, Yoon y Wu proponen un modelo para aguas poco profundas, donde se considera una geometría básica con fondo plano, velocidad del sonido constante y reflexiones especulares [ZYW95]. De esta manera, las pérdidas y tiempos de llegada de las señales se calculan de forma puramente geométrica, en función del tipo de reflexiones que hayan sufrido los rayos en su camino. Se define además el parámetro SMR (*Signal-to-Multipath*

*Ratio*), como una medida entre las interferencias constructivas producidas por versiones ligeramente retrasadas del mismo símbolo de modulación en la misma ventana de estudio, con las interferencias producidas en dicha ventana por símbolos diferentes. En función de este SMR, se identifican las mejores condiciones para la transmisión de datos, estudiando la dependencia con la profundidad de los transductores o el viento en la señal simulada.

En el mismo año, Geng y Zielinski proponen un modelo estadístico para considerar las fluctuaciones temporales en amplitud (conocidas como desvanecimiento o *fading*) y fase que sufre la señal acústica [GZ95]. El modelo está basado en el presentado en [ZYW95], pero ahora se diferencia para el desvanecimiento entre distribuciones Rayleigh y Rice en función de si existe una presencia importante de multicamino en la señal recibida o no, respectivamente, utilizando para ello el parámetro SMR antes definido. Asumiendo que el valor de SMR no es cero, lo que resultaría en una distribución Rayleigh, bajo este modelo se considera que cada componente del multicamino está formada a su vez por interferencias de un camino predominante y otras versiones distorsionadas de la misma señal desfasadas ligeramente en el tiempo y en amplitud. Estos valores que modelan los desfases se obtendrían estadísticamente, mientras que el cálculo de los distintos caminos que llegan del emisor al receptor (*eigenpaths*) se haría mediante el modelo de trazado de rayos descrito en [ZYW95].

Bjerrum-Niese *et al.* presentan un modelo de propagación válido para un canal de aguas poco profundas variable en el tiempo [BNBPQ96]. El modelo consta de dos etapas: primero, un modelo de trazado de rayos permite obtener la información de pérdidas y tiempos de las distintas llegadas. A continuación, los caminos que rebotan en la superficie se modelan con un coeficiente variable en el tiempo, que modula el comportamiento de esta señal reflejada y simula el efecto Doppler que sufren estos caminos. Este coeficiente se asume que es un proceso aleatorio Gaussiano de media cero y que queda determinado por su densidad espectral de potencia. Bjerrum-Niese y Lützen amplían este modelo posteriormente para incorporar el efecto de turbulencias en entornos subacuáticos [BNL00].

Galvin y Coates modelan el desvanecimiento de la señal acústica mediante procesos estadísticos [GC96]. El modelo se apoya en la teoría de rayos para obtener los retardos entre los distintos caminos que llegan al receptor, y utiliza un proceso Gaussiano que es distorsionado por procesos lineales y no lineales. Al final se obtiene la respuesta de un canal con una distorsión de tipo Rayleigh, aunque también podría modelar distribuciones arbitrarias.

El modelo GRAB (*Gaussian Ray Bundles*) se presenta en un informe del Centro de Guerra Naval Submarina (*Naval Undersea Warfare Center*, NUWC) [WK96]. Este modelo se basa en el trazado de rayos clásico para formar haces compuestos por rayos con las mismas propiedades, interpolando dichas propiedades para obtener la de los caminos que impactan en el receptor, como la presión acústica y los tiempos de vuelo. Posteriormente se aplica un factor a la energía de este haz siguiendo una distribución Gaussiana. El modelo contempla pérdidas de energía debido a la divergencia geométrica y a rebotes tanto en la superficie

como en el fondo, así como cambios de fase debido a estos rebotes y a las cáusticas. Pocos años después se le acopló el modelo CASS (*Comprehensive Acoustic System Simulation*) para añadirle una estimación de la reverberación provocada por estos haces [Kee00].

Appleby y Davies presentan un modelo bastante completo, que considera diversos efectos dinámicos como el efecto Doppler debido al movimiento de los transductores, ondas internas o corrientes producidas por las mareas [AD98]. El modelo es dependiente de la distancia en lo que respecta a la velocidad del sonido y la batimetría, y considera además la propagación a través de una capa de sedimentos en el fondo oceánico.

El grupo de Investigación y Desarrollo en Defensa de Canadá (*Defence Research and Development Canada*) utiliza como base el algoritmo BELLHOP en una versión de 2002 para añadir algunas mejoras. Entre estas mejoras destacan la posibilidad de utilizar frecuencias de 50 Hz, la inclusión de dependencia con la distancia en el perfil de velocidad del sonido y distintas zonas de batimetría para computar pérdidas por rebotes en el fondo (no incluidas entonces), así como una mejor estimación de los parámetros de pérdidas de transmisión por rebotes siguiendo diversos modelos no incluidos en el código original [RC05]. Esta modificación de BELLHOP, denominada BELLHOP-DRDC, se valida posteriormente con un modelo de ecuación parabólica para comprobar su funcionamiento. Uno de los trabajos más actuales es el de Wolff, Szczepanski y Badri-Hoehner, donde utilizan BELLHOP como base, obteniendo la respuesta del canal y añadiendo posteriormente el efecto dinámico producido por el movimiento de los transductores y el ruido [WSBH11].

Godin *et al.* utilizan como base un modelo de trazado de rayos, al que le añaden efectos estadísticos para tener en cuenta cambios en el perfil de velocidad del sonido en un entorno tridimensional, así como cambios en el entorno que tienen lugar en un tiempo inferior al de propagación de la señal [GZVG06].

Chitre presenta un modelo utilizado para estudiar propagaciones acústicas en aguas cálidas poco profundas [Chi07]. En este entorno se asume un fondo de profundidad constante y que toda la columna de agua está bien mezclada, por lo que no existe un gradiente de temperatura y los rayos seguirán líneas rectas. Estos rayos sufren un proceso de desvanecimiento con una distribución Rayleigh, considerándose además el ruido no Gaussiano producido por crustáceos y una variación estadística en los tiempos de llegada de los distintos rayos. El modelo fue validado experimentalmente con pruebas realizadas en Singapur.

Zhou y Shim utilizan el modelo BELLHOP para obtener un trazado de rayos estático en el entorno considerado, y a partir de ahí simulan un desvanecimiento de distribución Rayleigh y cambios aleatorios de fase mediante Simulink [ZS08]. El objetivo es realizar un estudio de la capacidad del canal y el nivel de ruido, de manera que se pueda utilizar esta información para adaptar el control de potencia en emisión. Con esta estrategia pretenden conocer cuándo el nivel de ruido es mayor y aprovechar así para enviar más información por el canal. El modelo se utiliza para simular la respuesta del sistema asumiendo la tasa



de transmisión óptima para cada caso, en función de la capacidad del canal y el nivel de ruido.

Cabría destacar también el modelo de propagación conocido como PlaneRay [HYBD08]. Este modelo utiliza como entradas el perfil de velocidad de sonido, la batimetría y el modelo geoacústico del fondo, y proporciona el trazado de rayos en el entorno considerado, así como los retardos y amplitudes de las componentes del multicamino y la respuesta en frecuencia del canal para los rayos que impactan en el receptor. Para calcular el trazado de rayos, se divide la columna de agua en distintas capas de igual profundidad y se calcula el trazado que seguiría un rayo de una capa a otra en forma de arcos de circunferencia. Los *eigenrays* se calculan interpolando para la distancia a la que se sitúa el receptor entre rayos de mismas propiedades en cuanto a rebotes, que impactan a la misma profundidad del receptor a diferentes distancias.

Por último, cabe también destacar que la aproximación de Socheleau es diferente a las habituales. En su modelo se utiliza trazado de rayos para obtener las distintas llegadas al receptor, así como la potencia de estas señales recibidas. En base a esta información, construye una función de dispersión (*Scattering function*) para cada una de las llegadas mediante un problema de optimización, obteniendo al final la representación de un canal variable en el tiempo basado en el principio de máxima entropía [SLP10]. El resultado se compara con pruebas reales, mostrando un buen comportamiento genérico en la reproducción de los resultados, achacando las diferencias a la propia naturaleza estadística del modelo frente a la realización concreta de una prueba real en un tiempo limitado.

### 2.1.2. Modos normales

Se considera que el origen de los modelos de modos normales se sitúa a finales de los años 40, cuando Pekeris desarrolló la teoría para su modelo [Ett03], una sencilla versión del océano compuesta por dos capas, como se ha comentado en la sección anterior. Sin embargo, el auge de esta técnica tuvo lugar en los años 70, gracias a la mejora en la capacidad de procesamiento de los ordenadores y en la aplicación de diversas técnicas para optimizar los cálculos [Jen88].

Los modelos de modos normales asumen para la ecuación de Helmholtz (2.2) una geometría cilíndrica en dos dimensiones y un medio estratificado en el que la velocidad del sonido y la densidad del agua ( $\rho_w$ ) únicamente dependen de la profundidad. En este caso, la función potencial independiente del tiempo toma la forma dada por (2.6) [Ett03]

$$\phi = F(z) \cdot S(r) \tag{2.6}$$

donde  $F(z)$  es una función que depende únicamente de la profundidad, y  $S(r)$  otra función que depende de la distancia. Sustituyendo en (2.2) y aplicando separación de variables, se

llega a las ecuaciones (2.7) y (2.8):

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + (k^2 - \xi^2)F = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dS}{dr} + \xi^2 S = 0 \quad (2.8)$$

donde  $\xi^2$  es la constante de separación. La ecuación (2.7) representa la parte estacionaria de la solución, mientras que (2.8) representa la parte viajera de la solución, por lo que cada modo normal se puede visualizar como una onda estacionaria en profundidad, y una onda viajera en el eje de distancias. La solución para la función potencial  $\phi$  dada por (2.6) se obtiene al final mediante (2.9) [Ett03]

$$\phi = g(r, \rho_w) \sum \frac{u_n(z) \cdot u_n(z_e)}{\sqrt{\xi_n}} e^{i(\xi_n r - \pi/4)} e^{-\delta_n r} \quad (2.9)$$

donde  $g(r, \rho_w)$  es una función que depende de la distancia y la densidad del agua,  $u_n$  es una función de modos normales que aparece al resolver la ecuación (2.7),  $z_e$  hace referencia a la profundidad del emisor,  $\xi_n$  representa los autovalores para las funciones  $u_n$ , y  $\delta_n$  es un coeficiente de atenuación. El subíndice  $n$  hace referencia a cada uno de los modos presentes, de manera que la solución total es la suma de las contribuciones de todos los modos.

Este número de modos depende directamente de la frecuencia de la onda emitida, por lo que no es recomendable aplicar la teoría de modos normales para frecuencias altas (Etter considera el mismo límite de 500 Hz que para trazado de rayos [Ett03]). Hay que tener en cuenta que esta restricción en frecuencia viene dada por problemas relacionados con los tiempos de cómputo, no por limitaciones físicas del modelo.

No obstante, para derivar la solución final dada en la ecuación (2.9) se asume que la contribución de modos que son altamente atenuados por su interacción con el fondo es despreciable (estos modos se denominan modos con pérdidas, del inglés *leaky modes*), de manera que este modelo es más correcto para estudios de campo lejano, puesto que la interacción anterior ocurre fundamentalmente a distancias cortas. Adicionalmente, el término de atenuación  $\delta_n$  requiere un buen conocimiento del fondo para ser lo más exacto posible.

Por el contrario, los modelos de modos normales cuentan con la ventaja de que las pérdidas de transmisión se pueden obtener muy fácilmente a partir de la función potencial, que no es más que la presión acústica. Esta función se calcula para las distancias y profundidades seleccionadas, conocidas la frecuencia y la profundidad del emisor, por lo que no hay que repetir el cálculo de las pérdidas si se cambia la ubicación del receptor, como sí ocurriría con los modelos de trazado de rayos.

La propia concepción del modelo es para medios estratificados, por lo que originalmente no se podían aplicar a medios dependientes de la distancia. Los primeros avances en este sentido tuvieron lugar en 1965, cuando Pierce propone un método para estudiar medios

con una dependencia suave con la distancia [Pie65]. En concreto, las características del medio no deben variar mucho en una distancia igual a una longitud de onda, pero su efecto acumulativo puede ser apreciable a largas distancias. Para ello, presenta una teoría de modos normales modificada donde se desprecia el acoplamiento de modos debido a estos cambios con la distancia. Esta aproximación es análoga a la teoría de aproximación adiabática de Born-Oppenheimer en Física del Estado Sólido, donde se desacopla el movimiento de los electrones y núcleos, de ahí que también se la conozca con el nombre de aproximación adiabática en propagación acústica.

El modelo SNAP hace uso de esta teoría [JF79]. Este modelo se desarrolló en el antiguo Centro de Investigaciones Submarinas del SACLANT perteneciente a la OTAN, actualmente renombrado como CMRE (*Centre for Maritime Research & Experimentation*). La intención de este modelo era ser aplicado a entornos de aguas poco profundas, ya que reconocía la limitación del método a entornos diversos de aguas profundas y frecuencias superiores al kilohercio, para los ordenadores de entonces. La primera versión de este código se publicó en 1974, realizando pruebas posteriormente para validarlo. Este modelo considera un entorno dividido en tres capas: una columna de agua, otra de sedimentos y un fondo semi-infinito, donde cada una de estas capas tiene una densidad y atenuación determinadas, y donde la velocidad del sonido puede variar con la profundidad únicamente en las capas de agua y sedimentos. Para simplificar las ecuaciones, se asume que no existen pérdidas y posteriormente se añaden como términos de perturbación. El modelo se validó comparándolo con los resultados de otros modelos, y también con tres conjuntos diferentes de resultados experimentales, mostrando buenos resultados según los autores para los casos en los que los parámetros son independientes de la distancia, no así para los dependientes.

El mismo centro propuso un método unos años después para extender el uso del modelo SNAP a aguas profundas y mayores frecuencias [FJK82]. El método consiste en reducir las inestabilidades que aparecen en aguas profundas cuando se tienen modos atrapados en el canal, debido a la forma del perfil de velocidad del sonido (este proceso se explicará más adelante en el capítulo 3). Para reducir el número de modos y evitar algunas inestabilidades esenciales, estos no se calculan en ciertas regiones, siguiendo un criterio puramente físico: la energía estará concentrada alrededor del canal acústico profundo, no muy lejos de éste. Por otra parte, para evitar inestabilidades que aparecen con ciertos modos de bajo orden, se sigue un criterio de búsqueda para encontrar a partir de qué orden los modos se convierten en evanescentes, truncando la columna de agua a una región determinada donde esto no ocurre. Los resultados fueron validados comparándolos con un modelo de trazado de rayos. Considerando esta mejora, se logró extender la frecuencia de uso del modelo SNAP hasta los 3.5 kHz, en lugar de los 200 Hz hasta los que operaba de forma correcta anteriormente. Adicionalmente, esta mejora no es exclusiva del modelo SNAP, sino que puede ser exportada a otros modelos de modos normales.

También relacionado con la aproximación adiabática, cabe destacar el trabajo de Nagl *et al.*, donde se amplía el uso de los modelos de modos normales para una dependencia

arbitraria con la distancia, en lugar de una dependencia gradual, como había sido la evolución a partir del trabajo de Pierce [NHHZ78]. Para ello, se resuelven las ecuaciones empleando una linealización por tramos de los parámetros del entorno. El modelo se aplica a un entorno de aguas profundas con un perfil de velocidad dependiente de la distancia, mostrando un buen comportamiento al compararlo con datos experimentales. También se aplicaron los resultados a un entorno de aguas poco profundas con profundidad variable, donde los resultados no fueron tan buenos. Los mismos autores apuntan al acoplamiento de modos como posible causa de este comportamiento.

No obstante y a pesar de las limitaciones, este modelo se puede aplicar de manera satisfactoria a problemas sencillos, como un fondo con profundidad decreciente, como se expone en [TZ97], siempre y cuando se incluyan los modos con pérdidas. La técnica de aproximación adiabática se expandió a entornos tridimensionales en el trabajo de Kuperman *et al.* [KPPP88], empleando para ello un número determinado de capas e interpolando entre ellas los distintos valores proporcionados por el modelo. Se fusionaron además técnicas de modos normales con otras de haces Gaussianos para obtener la refracción de los modos en este plano horizontal.

A diferencia de la aproximación adiabática, en el acoplamiento de modos se considera que puede existir un trasvase de energía de unos modos a otros, siendo así otra forma de evaluar entornos dependientes de la distancia. Uno de los modelos más conocidos basado en esta técnica es el de Evans [Eva83], que considera pérdidas de energía en el fondo, y además tiene en cuenta la energía rebotada por las discontinuidades verticales en la batimetría (*backscattering*), describiendo al final un acoplamiento total de un número finito de modos que se propagan en el medio y en el fondo. La contrapartida de la técnica de modos acoplados es que computacionalmente es mucho más exigente al tener que resolver las integrales de acoplamiento de modos para cada discontinuidad en el entorno. La última versión de este modelo (COUPLE) data de 2007 y se puede descargar de la página web de la *Ocean Acoustic Library* [oNR12].

Además de COUPLE y SNAP, otro modelo de gran interés y uso basado en modos normales es KRAKEN. Su origen se remonta a 1980, también en el centro SACLANT. Después de varios avances para incluir las propiedades elásticas del fondo y el efecto de las corrientes submarinas, el modelo se fusionó en 1984 con SNAP para formar SUPERSNAP. En cuanto a la dependencia con la distancia, actualmente permite realizar los cálculos siguiendo la aproximación adiabática o el acoplamiento de modos, e incluso permite realizar cálculos de propagación en tres dimensiones. En [Por10] se puede encontrar un extenso informe de la teoría desarrollada y del funcionamiento del modelo, cuya última versión data de 2010.

Un tratamiento diferente de la dependencia con la distancia, además de los modos acoplados y la aproximación adiabática, se puede encontrar en el trabajo de Primack y Gilbert [PG91], donde usan la aproximación conocida como modos en cuña (*wedge modes*).

Los entornos considerados en este trabajo se caracterizan por presentar una zona de fondo plano, seguida de una pendiente descendente y a continuación otra zona de fondo plano. Este entorno describiría una zona costera típica en su transición de la plataforma continental a aguas profundas, y evitaría realizar la consideración de fondos en escalón utilizada hasta la fecha para estudiar la dependencia con la distancia del fondo. Para utilizar el modelo de modos normales en estos entornos, los modos se calculan de la manera habitual en las regiones de fondo plano, pero en las regiones con pendiente se expresan en las coordenadas en cuña, que no son más que coordenadas polares. Para ello se realiza un cambio de sistema de coordenadas, utilizando ahora las coordenadas  $R$  y  $\theta$  en lugar de  $r$  y  $z$ , tal y como se representa en la figura 2.3. Después de calcular todos los modos, para lo que utiliza el modelo KRAKEN, el modelo tiene otra fase de cálculo donde se tiene en cuenta el campo inicial y el acoplamiento de modos, pero no se tienen en cuenta los modos con pérdidas.

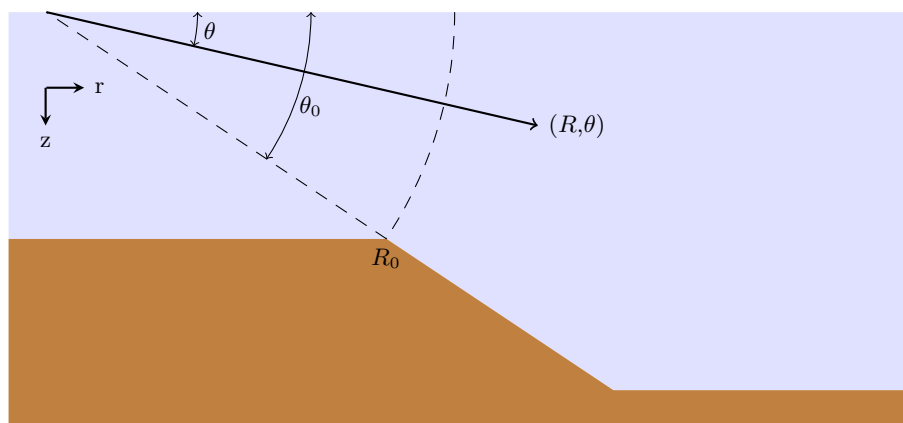


Figura 2.3: Aproximación de modos en cuña presentada en [PG91]

Fawcett, Westwood y Tindle generalizan el modelo de Primack y Gilbert y dividen el entorno por sectores en diferentes cuñas [FWT95]. En cada una de ellas se emplean las coordenadas de este tipo asumiendo que se propagan adiabáticamente, mientras que en la separación entre secciones se asume un acoplamiento de modos entre ambos conjuntos, incluyendo los modos con pérdidas, a diferencia del trabajo de Primack y Gilbert. El modelo se compara con uno de ecuación parabólica para validar sus resultados, mostrando un acuerdo bastante bueno con los resultados proporcionados por éste.

A partir de este momento, la mayoría de artículos consisten en optimizaciones de tiempos de cómputo o en la utilización de los modelos ya comentados para sus propios estudios, pero no aparecen grandes avances significativos en la propia teoría.

De estos últimos años se podrían destacar los trabajos de Ainslie, Packman y Harrison [APH98], donde se propone una mejora para ahorrar tiempo de cómputo en el cálculo de los modos que interaccionan en el fondo. Candy propone un sistema de detección basado en el control de cambios en el entorno mediante la comparación de datos provenientes en tiempo real con los de un modelo de modos normales que se utiliza en una fase de inicialización, en

la que se considera una situación normal [Can01]. Tollefsen y Eidem presentan un método para localizar fuentes explosivas mediante la combinación de un modelo de estimación de parámetros del entorno, y una variante más actualizada del modelo SNAP conocida como C-SNAP para realizar la propagación de la señal en base a estos parámetros [TE02]. Li, Liu y Zhang utilizan la teoría de modos normales para desarrollar un modelo de reverberación [LLZ04]. Clark y Smith proponen un modelo donde se emplean funciones de Bessel de orden  $1/3$  para buscar un compromiso entre eficiencia computacional y rigor matemático en la solución, aunque en ese momento el modelo no contemplaba interacciones con el fondo [CS08].

Para terminar la revisión de los modelos de modos normales, hay que mencionar que a pesar de la existencia de numerosos modelos basados en distintas técnicas, tal y como se ha expuesto aquí, siguen apareciendo propuestas de nuevos modelos, según las necesidades particulares. Tal es el caso del trabajo de Jinjin, Ping y Dong [JPD10], donde se emplea la teoría de modos normales de Pekeris para calcular la función de transferencia y aplicar un proceso de convolución a la señal emitida para obtener la señal recibida. Este trabajo está más enfocado a procesamiento de señal que los anteriores, que eran trabajos centrados en la propagación acústica en un determinado entorno, desde un punto de vista físico.

### 2.1.3. Ecuación parabólica

De forma similar a los modelos de trazado de rayos, los de ecuación parabólica comenzaron a utilizarse en otros campos diferentes a la acústica. Su origen se remonta a los años 40, en el estudio de Leontovich y Fock de la propagación de señales de radio en la troposfera, y más tarde se usaría en estudios de radiación óptica en láseres, física de plasma, propagación de haces u ondas sísmicas [Tap77].

Su uso en acústica subacuática llegaría décadas más tarde, cuando en 1973 Hardin y Tappert desarrollaron una solución numérica del método basado en las transformadas rápidas de Fourier (*Fast Fourier transform*, FFT) [Tap77]. Esta técnica tuvo una gran popularidad durante la década de los 80 y los 90, ya que estaba especialmente indicada para resolver problemas de propagación acústica a baja frecuencia y en entornos dependientes de la distancia, que eran los casos de mayor interés en aquella época.

Este método parte de la ecuación de Helmholtz bidimensional (2.2), introduciendo un número de onda de referencia  $k_0$  (asumiendo por tanto una velocidad de propagación de referencia  $c_0$ ), y considerando el índice de refracción del medio  $n(r, z) = c_0/c(r, z)$ , siendo  $r$  la distancia y  $z$  la profundidad. Se obtiene por tanto la ecuación (2.10) [JKPS11]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (2.10)$$

donde ya se ha sustituido la función potencial por la presión acústica  $p(r, z)$ . En esta ecuación se realizan ahora diversas suposiciones. Primero, se asume que la solución para la presión

acústica tiene la forma  $p(r, z) = \psi(r, z)H_0^{(1)}(k_0r)$ , donde  $H_0^{(1)}$  es la función de Hankel de orden cero y primera especie; se admite además que la función  $\psi(r, z)$  puede variar suavemente con la distancia  $r$ , y por último, se utiliza la aproximación de campo lejano,  $k_0r \gg 1$ , por lo que la función de Hankel se puede sustituir por su aproximación asintótica, llegando a (2.11)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\psi}{r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0 \quad (2.11)$$

Finalmente se vuelve a hacer uso de una condición comentada anteriormente: se asume que la dependencia con la distancia de la función  $\psi$  es muy suave, por lo que se puede despreciar su segunda derivada (primer término de la ecuación anterior) respecto al segundo término. Esta condición se conoce como aproximación paraxial, y resulta en la ecuación parabólica estándar (2.12), introducida por Hardin y Tappert:

$$2ik_0 \frac{\psi}{r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0 \quad (2.12)$$

donde esta aproximación únicamente es válida para ángulos pequeños, generalmente entre 10 y 15° respecto a la horizontal, ya que se introducen errores de fase que a partir de estos valores son apreciables [Tap77].

La ventaja de esta ecuación sobre la de Helmholtz, es que se puede resolver simplemente mediante métodos *marching* de resolución de ecuaciones diferenciales, en los que el campo se va calculando en valores crecientes de distancia utilizando información únicamente de estados previos. Para ello se necesita conocer las condiciones de contorno y las condiciones iniciales, es decir, el valor de la presión en el punto de emisión. Respecto a las condiciones de contorno, se considera una superficie de descompresión (*pressure-release surface*) para la superficie del mar, donde la presión acústica se hace nula cuando se llega a dicha superficie. Para el fondo se emplea un modelo más complejo, donde se considera que un coeficiente de absorción volumétrico aumenta considerablemente de valor cuando la profundidad es mayor que la del fondo marino. En cuanto a las condiciones iniciales, el método más sencillo consiste en asumir que si no hay nada cercano a la fuente en varias longitudes de onda, el campo inicial se puede aproximar como una onda esférica. Este método para resolver la ecuación parabólica se conoce como *split-step*, y fue la primera técnica utilizada.

Como la idea inicial del modelo era ser usado para muy largas distancias, del orden de decenas de kilómetros, el usar ángulos pequeños no afectaba de manera apreciable, ya que la energía que se recibe a estas distancias proviene casi exclusivamente de caminos que se han propagado con un ángulo pequeño, realizando una analogía con los trazados de rayos.

Este modelo proporciona resultados más precisos que el de modos normales (en lo que respecta a ambas derivaciones iniciales), ya que no desprecia el acoplamiento de modos. A diferencia de los modelos de trazados de rayos, estos modelos se pueden usar a frecuencias muy bajas, pero el coste computacional a frecuencias elevadas hacía prohibitivo su uso más allá de los 500 Hz.

Estos modelos se muestran además especialmente útiles en entornos dependientes con la distancia, donde el resto de modelos matemáticos presentaban más dificultades, pero es muy sensible a la elección del campo inicial. Adicionalmente, se encuentran limitados cuando la interacción con el fondo es importante, de manera que durante los siguientes años se propusieron algunas correcciones como las de Bucker [Buc82], que permite incluir algunos de los efectos de un fondo irregular en el modelo original, mejorando los resultados obtenidos en estos casos. Entre las primeras mejoras al modelo original, el propio Tappert detalla la formulación necesaria para incluir densidades variables e incluso el efecto de la curvatura de la Tierra [Tap77], aunque no la incorpora al modelo en ese momento para las simulaciones que se presentan. El método de *split-step* Fourier se ha implementado en sistemas como PESOGEN (*Parabolic Equation SOLUTION GENERator*) [NPDT84].

Se realizaron también esfuerzos por crear algoritmos que permitieran resolver la ecuación parabólica en entornos tridimensionales. Así, Baer y Moseley [BM77] presentan en 1977 un modelo basado en el método *split-step* Fourier para resolver la ecuación parabólica en un caso tridimensional, siendo comparado posteriormente con la solución teórica para un campo inicial tridimensional, mostrando buen acuerdo. Posteriormente, Perkins y Baer [PB82] presentan otro algoritmo en el que se computan  $N$  casos bidimensionales a distintos ángulos azimutales para formar una aproximación de un entorno tridimensional, con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo (reduciéndolo a la mitad) y poder usar frecuencias mayores, de algunas decenas de hercios. Este modelo se compara con el anterior de 1977, mostrando diferencias que en los peores casos llegan al 8-10% de error relativo.

Una mejora a la condición de ángulos pequeños fue propuesta en 1983 por Thomson y Chapman [TC83]. En este trabajo se hace uso de una técnica utilizada en fibras ópticas y que puede ser adaptada a la resolución de la ecuación parabólica por *split-step* Fourier, obteniendo mejores resultados al disminuir el error de fase producido en el método original para ángulos elevados. Los resultados se comparan con simulaciones de un modelo de ecuación parabólica normal y otro de modos normales (SNAP) utilizado como referencia, mostrando en general mejor comportamiento que la ecuación parabólica normal. No obstante, aparecen algunas diferencias notables en algunos de los casos estudiados al compararlo con el modelo SNAP.

Además de la técnica de *split-step* original, se comenzaron a investigar distintas formas de resolver la ecuación parabólica con el objetivo de obtener mejores resultados en entornos complejos. Claerbout introduce una técnica diferente a la propagación de onda progresiva (*Progressive Wave Equation*, PWE) en el dominio temporal para obtener las soluciones a la presión acústica en este dominio [Cla76]. A diferencia de la técnica PWE, que proporciona la evolución de la presión acústica en el tiempo, la ecuación parabólica en el dominio temporal (*Time-Domain Parabolic Equation*, TDPE), que no es más que la transformada de Fourier inversa de la ecuación parabólica, proporciona la evolución de la presión acústica con la distancia. Esta solución es especialmente útil para señales con un determinado ancho de banda, ya que en el dominio de la frecuencia hay que descomponer y resolver el problema



para cada una de ellas.

Posteriormente, Collins extiende el uso del método TDPE para propagaciones con grandes ángulos [Col88], y poco después considera una aproximación en serie de Padé para obtener una ecuación parabólica de orden elevado [Col89], donde este orden viene dado por los términos de la serie. Con esta aproximación se pretende buscar un mejor comportamiento para ángulos elevados, en regiones donde la velocidad del sonido varía notablemente, así como propagaciones a muy larga distancia. Los resultados, tanto para la ecuación parabólica de orden elevado como para su versión temporal, se contrastan con una ecuación parabólica normal, observando claras diferencias.

El trabajo de Collins fue el germen que acabó resultando, con mejoras posteriores, en el modelo RAM (*Range-dependent Acoustic Model*), uno de los más conocidos y usados basados en la ecuación parabólica [Col99]. Además de basarse en el método de *split-step* Padé, incorpora una corrección de conservación de energía para entornos dependientes de la distancia, y un método más exacto y eficiente para la generación del campo inicial.

Otra técnica para resolver la ecuación parabólica fue introducida en 1978 por Lee y Papadakis [LPD78, LP80]. El método consiste en sustituir la derivada parcial de segundo orden en  $z$  de la ecuación (2.12) por un operador de diferencia finita, convirtiendo la ecuación parabólica en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden (*Ordinary Differential Equations*, ODE). Con esta técnica se consigue usar un paso para distancias más grande que en el método *split-step* pero manteniendo la exactitud, así como integrar el uso de la batimetría como una condición inicial y no como una de contorno, mediante la división del fondo en distintos segmentos en los que se aproxima como una línea recta. En esta aproximación no es necesario conocer propiedades del substrato marino, como sí ocurre al utilizar *split-step*.

Una variante de este método es la técnica de diferencia finita implícita (*Implicit Finite-Difference*, IFD), investigado por Lee, Botseas y Papadakis y presentado en 1981 [LBP81]. Esta técnica presenta la misma propiedad de fondos por segmentos que la técnica ODE, pero requiere menos memoria que ésta, siendo igual de eficiente según sus autores. Además, la ventaja del método implícito frente al genérico es principalmente evitar el uso de pasos extremadamente pequeños para la computación de la ecuación parabólica, consiguiendo un cálculo más rápido y estable que con la diferencia finita. El modelo se compara con otro de modos normales y un modelo basado en *split-step*, mostrando buen acuerdo con los resultados de este último, demostrando que no pierde exactitud.

Lee y Botseas emplean esta técnica y definen además unas condiciones de contorno arbitrarias para la superficie y el fondo, y un año después se ampliaría este modelo para admitir ángulos de  $40^\circ$ , en lugar de los  $15^\circ$  del límite anterior [LB82]. Robertson *et al.* presentan un modelo con un paso adaptativo en función del error cometido en cada uno de ellos y una tolerancia determinada [RAJS89], con el objetivo de mejorar la eficiencia de otros modelos basados en esta técnica. En el artículo se comparan los resultados y tiempos de

cómputo con un modelo basado en IFD sin este proceso adaptativo, mostrando resultados análogos hasta decenas de kilómetros, punto en el que los resultados empiezan a divergir.

En 1983 Tappert propone un modelo híbrido denominado HYPER (*HYbrid Parabolic Equation Ray*) [Tap83, TLW84], que emplea un trazado de rayos para obtener los caminos más relevantes, resolviendo entonces la ecuación parabólica en las cercanías de estos caminos. El objetivo es obtener un modelo cuyo tiempo de cómputo no dependa tan fuertemente de la frecuencia como ocurre con los de ecuación parabólica, pero que tenga en cuenta los efectos de difracción, obviados por el trazado de rayos. De esta forma, se puede utilizar una técnica híbrida que permita aprovechar la fiabilidad de cálculo de los modelos de ecuación parabólica para altas frecuencias, mayores que los habituales 500 Hz que se suele usar como tope.

Estos 20 años de desarrollo en torno a la ecuación parabólica asentaron unas bases de diferentes técnicas a utilizar. Estos modelos fueron posteriormente usados en aplicaciones muy diversas, o incluso continuaron con su refinamiento en décadas posteriores para mejorar tiempos de cómputo o exactitud en el cálculo, a medida que los ordenadores se volvieron más potentes.

Por citar algunos ejemplos de uso de modelos de ecuación parabólica en los últimos años, Scanlon, Bourke y Wilson emplearon el modelo FEPE (*Finite-Element Parabolic Equation*) para obtener una estimación más correcta de la interacción con el fondo oceánico para una aplicación sónar [SBW96]. Thomson, Ebbeson y Maranda utilizaron el algoritmo *split-step* Padé presentado por Collins para un sistema de localización de emisor por *matched-field* [TEM97]. Xie, Gibson y Diaz-Gonzalez emplean el modelo MMPE [Smi03] para realizar un mapeado de las pérdidas de transmisión en un entorno determinado, de manera que esa información pueda ser aprovechada posteriormente para diseñar una red de sensores [XGDG06]. Fabre y Dennis emplearon el modelo RAM para realizar un estudio de la variabilidad de la propagación acústica en un entorno determinado en función del cambio de diversos parámetros, de manera que se pudiera utilizar esta información como dato para buscar un emplazamiento óptimo para sensores [FD07]. Rosenberg, Chizhik y Zhang emplearon una versión modificada de RAM para calcular la ecuación parabólica en entornos donde la superficie del mar está afectada por olas generadas por el viento, y calcularon cómo afecta a la propagación acústica estas variaciones temporales de la superficie de reflexión [RCZ09]. Dos años después, Boyles, Rosenberg y Zhang estudiaron con dicho modelo el efecto de zonas de burbujas causadas por las olas en la propagación acústica [BRZ11].

#### 2.1.4. Expansión del multicamino

La idea principal de esta técnica parece provenir fundamentalmente de varios trabajos de la década de los años 60 que sentaron las bases matemáticas [Wei75], principalmente de Leibiger y su modelo RAYMODE [Ett03]. Los modelos de expansión del multicamino (*multipath expansion*) parten de las ecuaciones (2.7) y (2.8), llegando a la misma ecuación

dependiente de la profundidad que se obtiene para la función potencial utilizando modos normales, asumiendo también simetría cilíndrica. A partir de aquí, se reescribe la función potencial (que al igual que antes es la presión acústica dependiente de la distancia  $r$ , profundidad  $z$ , profundidad del emisor  $z_e$  y frecuencia angular  $\omega$ ) como un sumatorio de presiones, donde cada una de ellas se expresa como una integral. Esto es lo que se conoce como expansión del multicamino. La presión acústica total viene dada por (2.13)

$$P(r, z, z_e; \omega) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \sum_{n=0}^4 P_n^{(\nu)}(r, z, z_e; \omega) \quad (2.13)$$

donde el segundo sumatorio tiene en cuenta cuatro caminos básicos de propagación: un camino directo, un camino con rebote en fondo, otro con rebote en superficie y otro con rebote en ambas. En definitiva, se está asumiendo que la presión acústica está formada por distintas contribuciones de familias de rayos diferentes. Cada una de estas presiones  $P_n^{(\nu)}(r, z, z_e; \omega)$  viene dada por una integral que depende de varios términos. Para obtener dichos términos se utiliza la aproximación conocida como WKBJ (de Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffreys) y se aplican condiciones de contorno en la superficie y en el fondo para obtener los coeficientes de reflexión, permitiendo evaluar así las integrales y obtener la presión acústica como función de la distancia y la profundidad.

Una de las ventajas de esta técnica es que trata correctamente los puntos de inflexión y difracción, y calcula la presión acústica en cáusticas y zonas de sombra, a diferencia de los modelos de trazado de rayos [Ett03]. Como contrapartida, es una técnica que requiere más tiempo de cómputo y es válida únicamente para fuentes armónicas. La técnica expuesta por Weinberg [Wei75] fue evaluada comparando sus resultados con la predicción teórica o con un modelo basado en la técnica *fast-field*, concluyendo que es una técnica más precisa que el trazado de rayos y más ligera en cuanto a tiempo de cómputo que la de modos normales.

A pesar de esta aparente ventaja, la técnica de expansión del multicamino no ha gozado de popularidad, estando en clara desventaja en cuanto a uso comparada con los modelos de trazado de rayos, modos normales o ecuación parabólica, no encontrándose demasiados trabajos en ella. Una contribución destacable dentro de esta técnica vino dada por Clark [Cla05], donde se amplía el uso de este modelo para entornos dependientes con la distancia tanto en la profundidad (o incluso tipo de fondo) como con la velocidad del sonido. El modelo se compara con resultados experimentales u otros modelos, mostrando buen acuerdo.

### 2.1.5. Integración de número de onda

El método de integración de número de onda (*Wavenumber Integration*) tiene su origen en el trabajo de Pekeris de 1948, al igual que los modelos de modos normales, ya que ambos se encuentran relacionados. También tuvieron parte en su origen los trabajos posteriores de Jardetzky, Ewing y Press durante la década de los 50 en estudios de propagación de ondas sísmicas en guías de onda estratificadas [JKPS11].

Originalmente, la técnica de integración de número de onda considera un medio estratificado y no dependiente de la distancia, de manera que el número de onda solo dependa de la profundidad. Bajo esas condiciones, se puede aplicar una transformación de Hankel a la ecuación de Helmholtz para obtener una ecuación diferencial ordinaria en una dimensión (profundidad). La solución para la presión acústica se obtiene empleando la transformada inversa de Hankel, llegando a la ecuación (2.14) [JKPS11]:

$$p(r, z) = \int_0^{\infty} p(\kappa, z) \kappa J_0(\kappa r) d\kappa \quad (2.14)$$

donde  $\kappa$  es el número de ondas en el plano horizontal. Esta ecuación debe resolverse para cada una de las capas en las que se divide el medio estratificado, con un valor diferente de  $\kappa$ , por lo que es un planteamiento efectivo si este número es pequeño, pudiéndose resolver de forma cerrada. En cambio, si el número de capas es elevado hay que recurrir a métodos numéricos.

Este tipo de modelos se utilizaron bastante en estudios de propagaciones a no muy larga distancia y con gran interacción con el fondo oceánico, donde tradicionalmente los modelos anteriores funcionaban peor. De hecho se utilizaron como modelos de referencia para validar otros modelos que operaban en condiciones similares. No obstante, la condición de medios estratificados limita el uso de estos modelos para entornos independientes de la distancia, y aunque algunos trabajos posteriores suavizaron esta restricción, no es tan sencillo de aplicar como en el modelo de modos normales [Sch91].

En entornos subacuáticos, en los que el campo cercano no suele ser de interés, el método más importante de integración de la ecuación (2.14) es la técnica *fast field* (FFP, *Fast Field Programs*). Esta técnica se aplicó en entornos subacuáticos en 1980 por DiNapoli y Deavenport, aunque el origen de la técnica FFP se remonta a los trabajos de Marsh y Elam en 1967 y DiNapoli en 1971 [DD80].

En el campo de la propagación acústica subacuática, se mezcla la denominación de modelos de integración de número de onda y modelos FFP, debido a la gran importancia de esta técnica en la resolución de la integral. Este método consiste en utilizar la transformada rápida de Fourier (FFT). Para ello, en la ecuación integral (2.14) se sustituye la función de Bessel por su aproximación asintótica y se discretizan los valores de  $\kappa$  y  $r$ , lo que permite transformar la integral en un sumatorio, que puede ser evaluado ya por la FFT. El resultado es el valor de la presión acústica para cada uno de los valores discretos de  $r$  que se han considerado.

De forma similar a la variante TDPE en los modelos de ecuación parabólica, los modelos FFP también cuentan con su variante en el dominio temporal, presentada por Porter en 1990 [Por90], de manera que puedan solucionar problemas en los que la fuente no sea un tono monofrecuencial, sino que tenga cierto ancho de banda. Este modelo permite obtener las soluciones en el tiempo para distintas profundidades, donde estarían ubicados los receptores.

El modelo SAFARI emplea una aproximación diferente para resolver esta ecuación

dependiente de la profundidad, denominada de matriz global [Sch88]. En este caso, el campo en cada capa se considera formado por una superposición de campos creados por un número arbitrario de fuentes (lo que hace este modelo interesante para estudios de *phase arrays*) y un campo cuyo valor se calcula a partir de las condiciones de contorno que se han de satisfacer en todas las capas. Esta implementación permite conocer el campo para distintos receptores simultáneamente, y presenta buenas propiedades en cuanto a estabilidad y tiempo de cómputo. Por contra, requiere de un extenso conocimiento de la física de propagación y de análisis numérico, ya que las transformadas integrales inversas no se pueden automatizar, y hay que resolverlas dependiendo de cada caso, teniendo en cuenta las discretizaciones necesarias y el error que se puede introducir.

Este modelo fue mejorado un par de años después con el trabajo de Seong [Seo90], que combina la técnica de integración de número de onda presentada en SAFARI con una integral de contorno de Galerkin. De este modo, obtiene un modelo híbrido analítico-numérico que permite emplear este modelo en entornos dependientes de la distancia, así como obtener información de la energía perdida que no se propaga en el sentido positivo del eje de distancias (*backscattering*).

Unos años después aparece otra mejora con la inclusión de fondos considerados como medios elásticos para estudiar la interacción de la onda en ellos [GS96], utilizando para ello técnicas de elemento finito. Los resultados se comparan con modelos basados en técnicas diferentes (como elementos de contorno o el modelo FEPE de ecuación parabólica) para varios casos diferentes, mostrando buen acuerdo en general salvo para reproducir el *backscattering*.

Como resumen de esta sección, se han recogido en la tabla 2.1 las características de las cinco técnicas estudiadas que revisten más interés para el trabajo desarrollado en esta tesis. Dependiendo del entorno donde se propague la señal, así como de la frecuencia y el ancho de banda de la señal acústica a emitir, algunas de las técnicas se pueden aplicar correctamente (✓), mientras que otras no (✗); también puede darse el caso de técnicas que se pueden aplicar bajo unas determinadas restricciones (≈).

Técnica	Alta frecuencia (> 500 Hz)	Dependencia con la distancia
Trazado de rayos	✓	✓
Modos normales	≈	≈
Ecuación parabólica	✗	≈
Expansión del multicamino	✓	✗
<i>Fast field</i>	✓	✗

**Tabla 2.1:** Comparativa de las propiedades principales de las principales técnicas de modelado

## 2.2. Uso de señales codificadas en entornos subacuáticos

El medio subacuático presenta unas características muy variables tanto en el espacio como en el tiempo. Las señales que se propagan por este medio sufren de un elevado multicamino, de manera que se originan en recepción diversas réplicas de la señal original que aparecen desplazadas en el tiempo. Este efecto produce lo que se denomina Interferencia entre Símbolos (*Inter-symbol Interference*, ISI), y provoca la degradación de la información transmitida.

Existe también una gran variabilidad temporal en el canal, debido a cambios medioambientales. Esta variabilidad provoca un efecto conocido como desvanecimiento (*fading*), consistente en la variación de la amplitud de la señal recibida en el tiempo, respecto al valor esperado. Adicionalmente hay que tener en cuenta el ruido presente en el medio, provocado tanto por agentes externos (barcos que pueden estar navegando), como por procesos naturales. Todos estos efectos dependen de distintas características del entorno considerado, como la profundidad y distancia entre transductores o el estado del mar.

A lo largo de los años se han usado distintas técnicas para minimizar los efectos de ISI, como la técnica PPC (*Passive Phase Conjugation*) [ZHDL10]. Esta técnica requiere sin embargo de un array vertical de receptores, lo que incrementa sustancialmente el coste del sistema. Otra alternativa es emplear un ecualizador mediante el cual se pueda conocer la respuesta al impulso y corregir la señal recibida [Yan04]. Sin embargo, la variación temporal del canal subacuático obligaría a ir actualizándolo cada cierto tiempo mediante la emisión de señales de prueba, lo que requeriría una emisión adicional y una etapa más de proceso de señal.

Para mitigar los efectos perjudiciales de los fenómenos anteriormente descritos, además de permitir el acceso al canal de múltiples usuarios simultáneamente, se puede codificar la señal acústica empleando técnicas de espectro ensanchado, o DSSS-CDMA (*Direct-Sequence Spread-Spectrum Code-Division Multiple Access*). Adicionalmente, la técnica CDMA resulta de gran importancia para obtener mayor precisión en sistemas basados en estimaciones de tiempos de vuelo, evitando así el error obtenido mediante detección de envoltente, tal y como refleja la figura 2.4, donde se muestra una señal recibida (a) y el tiempo detectado por este método (b).

Esta técnica aporta cierta inmunidad frente al multicamino y al ruido, cuyo efecto puede verse potenciado por el desvanecimiento. Así mismo, las técnicas CDMA no requieren de una sincronización tan precisa como las basadas en TDMA (*Time Division Multiple Access*) y pueden hacer un uso más eficiente del limitado ancho de banda de los entornos subacuáticos que las técnicas FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) [APM05]. Adicionalmente, las técnicas CDMA no son tan sensibles a los grandes y variables tiempos de propagación habituales en este tipo de entornos, como sí ocurre con las técnicas TDMA. Tampoco requieren de un array de receptores ni sería necesario ecualizar el canal, por lo que para

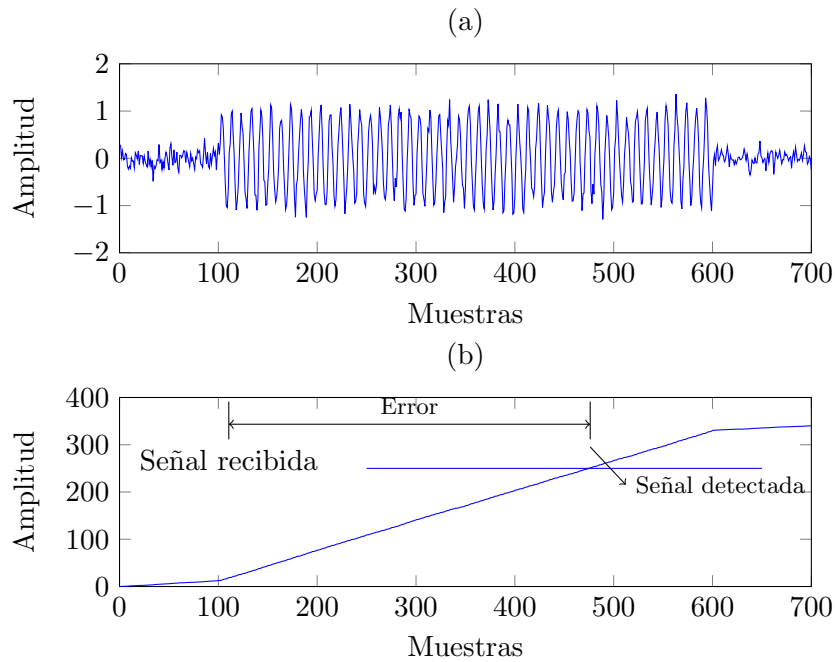


Figura 2.4: Diferencia en la estimación del tiempo de vuelo en una señal recibida (a) mediante la detección de envolvente (b)

ciertas aplicaciones como sistemas de posicionamiento, se plantea como un alternativa muy viable. No obstante, tampoco es extraño encontrarse sistemas que hacen uso de ecualizadores para mitigar el efecto del canal en la detección de los códigos empleados en los sistemas CDMA.

El uso de técnicas CDMA en entornos subacuáticos tuvo su auge en la década de los 90, cuando comienzan a aparecer diversos trabajos explorando esta solución. Entre estos trabajos se puede citar el de Fischer *et al.* [FBR<sup>+</sup>92], donde presentan un transductor acústico utilizado como módem, empleando técnicas de espectro ensanchado para expandir el ancho de banda de la señal y ganar robustez frente al multicamino y el desvanecimiento. La tasa de transmisión que lograron fue de 625 bps.

Por otra parte, Haller y Lemon utilizan una secuencia-m de longitud 63 y modulada con tres ciclos por símbolo para un sónar de barrido lateral (*Side-scan sonar*) [HL93]. El motivo de usar una señal codificada fue nuevamente mejorar las prestaciones en la detección de objetos aprovechando las ventajas de las técnicas CDMA comentadas anteriormente.

En lo que respecta a los sistemas de posicionamiento y seguimiento, uno de los primeros trabajos en resaltar la importancia de las señales codificadas fue el de Austin [Aus94]. Hasta entonces, la mayoría de sistemas de seguimiento utilizaban ráfagas de pulsos, pero en este trabajo se propuso usar técnicas de espectro ensanchado para aprovechar mejor el ancho de banda de los transductores y mejorar la relación señal-ruido, así como minimizar los errores en la detección de distancias o fases en los sistemas de posicionamiento subacuático. En el artículo se muestran las mejoras que se pueden obtener en sistemas que emplean señales

codificadas frente a los basados en pulsos, tanto en la detección de los tiempos de vuelo como en su posterior aplicación en diferentes tipos de sistemas de posicionamiento.

Otro trabajo que apunta en la misma dirección es el de Loubet *et al.* [LCF1997], donde comentan las ventajas de técnicas DSSS, como la posibilidad de sistemas multiusuario, la robustez frente al desvanecimiento gracias al ensanchamiento en frecuencia que sufre la señal, al multicamino gracias a la resolución especial conseguida, y mejoras en los valores de SNR tolerados por el sistema gracias a la robustez frente al ruido. Sin embargo, el aumento de ancho de banda y la disminución de la tasa de datos provocada por la codificación puede ser un problema en algunos sistemas. En el mismo trabajo se documentan pruebas experimentales con secuencias Gold y Kasami.

Una vez apuntadas las ventajas de las técnicas de procesado de señal, durante los siguientes años se fueron probando distintos códigos, tanto en simulaciones como con pruebas reales. El objetivo de estos estudios era determinar la eficiencia de estos códigos en distintos entornos y características, así como para diferentes aplicaciones, entre las que destacan las de comunicaciones.

En lo que respecta a las comunicaciones, Plaisant [Pla98] utiliza secuencias pseudoaleatorias para transmitir información codificada de un punto a otro, y hace especial énfasis en la utilidad de esta técnica en ambientes ruidosos. Se realizaron transmisiones exitosas para un valor de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) de -14 dB en el mar Mediterráneo a distancias de 50 km entre transductores, utilizando para ello un código TABU de 72 bits y probando también con códigos Kasami de 63 bits, emitidos a una frecuencia de 1.7 kHz.

Los módems acústicos subacuáticos también se beneficiaron del uso de señales codificadas. Sozer *et al.* [SPS<sup>+</sup>99] presentan un módem subacuático basado en la técnica de espectro ensanchado, utilizando una portadora de 12 kHz y codificando la información mediante códigos Gold de longitud 2047. Adicionalmente, emplean un filtro Rake para aprovechar la diversidad temporal del canal en recepción. Se probó la transmisión de estos códigos en un entorno de aguas poco profundas.

Otro trabajo de interés es el módem de Freitag *et al.* [FGSJ00], donde incorporan éste a un AUV con el objetivo de que este vehículo transmita información sobre su estado y medidas realizadas en el medio. Para ello codifican la información utilizando códigos Gold. El módem está diseñado para transmitir a 10 kHz con una tasa de 4000 símbolos por segundo, y se consiguió establecer un enlace incluso para aguas muy poco profundas (de 3 a 8 metros), donde el multicamino es realmente severo.

Frassati *et al.* analizan técnicas de modulación basadas en OFDM (*Orthogonal Frequency Divison Multiplex*) y en DSSS [FLLP05]. En lo que respecta a las técnicas DSSS, emplean códigos Gold de longitud 15 y modulados tanto en BPSK (*Binary phase-shift keying*, modulación binaria por desplazamiento de fase) como QPSK (*Quadrature phase-shift keying*, modulación en cuadratura por desplazamiento de fase). Estos códigos se emiten a una frecuencia de 5.5 kHz, alcanzando tasas binarias de 125 bps (BPSK) y 245 bps (QPSK).



Tanto el emisor como el receptor son omnidireccionales, y se muestran los porcentajes de una recepción exitosa para varias distancias, comprendidas entre 1 y 12 km. Estos porcentajes son mayores para el caso de la modulación OFDM, achacado al hecho de que aprovecha mejor la energía del multicamino que la técnica DSSS, puesto que aquí se eliminaba éste empleando un ecualizador.

Uno de los trabajos más recientes en este campo es el de Zhang *et al.* [ZHDL10], donde emplean técnicas de espectro ensanchado para obtener más inmunidad frente al ruido. Para ello utilizan secuencias-m de longitud 255 y un receptor PPC. Estas secuencias se utilizan tanto en la señal para testear el canal y obtener su respuesta impulsiva, como para transmitir la propia información que se pretende comunicar. La frecuencia de portadora del sistema es de 12 kHz, lográndose transmitir información a distancias de 2.3, 4.3 y 8 km.

A medida que comenzó a incrementarse el uso de sistemas con señales codificadas, se vio la necesidad de estudiar la influencia de distintos efectos del canal subacuático en estas señales, así como mejorar o proponer diversas alternativas de receptores. Tsimenidis *et al.* proponen tres modelos de receptores adaptables preparados para la correlación de secuencias-m empleando un array de receptores [THSA00]. El desempeño de estos receptores se probó con señales moduladas en QPSK con una portadora de 9.6 kHz emitidas en el Mar del Norte, obteniendo detecciones sin errores para casos estáticos, e investigando la influencia del desplazamiento Doppler en la detección de la señal.

Stojanovic y Freitag estudiaron dos tipos de receptores de diferente complejidad mediante la identificación de secuencias Kasami de longitudes 15, 63 y 255, moduladas en QPSK y emitidas a 33 kHz [SF06]. Estos receptores consistían en arrays de sensores que empleaban además un proceso de ecualización en la señal recibida. El emisor se encontraba a 2.3 km, en un entorno de aguas poco profundas (en torno a 100 m), y se lograron obtener tasas de transmisión de  $10 \text{ kb}\cdot\text{s}^{-1}$ .

En el trabajo de Bingham *et al.* se realiza un estudio del desempeño de varios códigos para distintos casos de ruido Gaussiano y condiciones de multicamino [BBM07]. Para ello consideran un modelo de canal simplificado, donde la respuesta al impulso contiene una o dos llegadas de una amplitud determinada. En el trabajo se analizan códigos Gold, Barker y secuencias-m de distintas longitudes, y se apunta a la mejoría de resultados para longitudes de código mayores. No obstante, en experimentos reales se pudo comprobar que a longitudes de código grandes los resultados no son mejores, apuntando a cambios en la fase de la señal como posible causa. Un estudio similar lo realizan Kido, Fujimoto y Osada [KFO11], donde comprueban la influencia del multicamino en la detección de una señal codificada, en este caso una secuencia-m.

Las técnicas CDMA han encontrado otro campo de gran interés recientemente en las redes de sensores subacuáticos, gracias a la capacidad de soportar accesos de múltiples usuarios al canal. Proakis, Rice y Stojanovic ya comentaban en 2001 que la técnica CDMA parecía la más indicada para controlar el acceso al medio en redes de sensores, frente al uso

de TDMA o FDMA [PRS01].

Salvá-Garau y Stojanovic [SGS03] dividen los nodos de una red en grupos, donde los nodos de un mismo grupo se comunican entre sí siguiendo un protocolo basado en TDMA. Pero para aprovechar espacialmente los mismos intervalos temporales y para establecer una comunicación entre los distintos grupos, cada uno de estos grupos lleva asignado un código. En el artículo se ponen como ejemplo códigos Gold y Kasami.

Grythe *et al.* presentan los resultados de una campaña de medidas relacionadas con la preparación de una red de sensores [GHMR08]. Entre las diversas pruebas realizadas, se mide la capacidad del canal para sistemas SISO (*Single Input Single Output*) y MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), donde para las pruebas MIMO se emplean códigos Kasami de longitud 127 y 255.

Uno de los trabajos más recientes que emplean CDMA en redes de sensores es el de Pompili, Melodia y Akyildiz [PMA09], donde describen un protocolo de acceso al medio (*Medium Access Control*, MAC) basado en el uso de técnicas CDMA para ser usado en redes de sensores. La razón de la elección de esta técnica, según los autores, se debe a las propiedades de robustez frente al *fading* en frecuencia, al efecto del multicamino y a que permite la emisión simultánea de diferentes nodos. En la misma línea está el trabajo de Ping *et al.*, donde se propone un protocolo MAC basado en CDMA con un control adaptativo de la energía transmitida para solventar problemas derivados interferencias por acceso múltiple [PDJ<sup>+</sup>13].

Finalmente, en aplicaciones s3nar tambi3n se pueden encontrar trabajos recientes sobre el uso de t3cnicas de codificaci3n, como el de Pecknold *et al.* [PRM<sup>+</sup>09]. En este trabajo se presenta un sistema s3nar que utiliza ondas de Costas para la detecci3n simult3nea de la posici3n y la velocidad del objetivo, donde estas ondas son secuencias consistentes en distintos pulsos de ondas continuas a distintas frecuencias. En recepci3n se emplea un filtro acoplado para detectar la se3al original.

### 2.3. Sistemas de posicionamiento en entornos subacu3ticos

De manera an3loga al posicionamiento terrestre, conocer la ubicaci3n de un determinado elemento, ya sea un robot sumergible o un sensor que est3 recopilando datos dentro de una red, por citar dos ejemplos, suministra una informaci3n vital para posteriores aplicaciones o procesamiento de datos. En el caso de los robots sumergibles, obtener la posici3n es el paso previo para las aplicaciones de guiado y navegaci3n, donde se requiere que el robot siga una determinada trayectoria. Por otra parte, en redes de sensores es de suma importancia asociar a los datos de cada sensor la posici3n donde se han obtenido, puesto que en caso contrario, estas medidas carecen de valor. Adicionalmente, en lo que respecta a seguridad es importante conocer la posici3n de los sensores, por si hay un mal funcionamiento o accidente de cualquier tipo y hay que proceder a su recuperaci3n.

El posicionamiento en entornos subacuáticos es un problema que se ha ido abordando con creciente interés desde la década de los años 50. Entre los primeros trabajos destacan los de Swallow en 1957, en el que se realizaba un seguimiento de plataformas flotantes, y el sistema de posicionamiento del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington, consistente en un transductor y cuatro hidrófonos montados en el fondo marino, en 1958 [HMM<sup>+</sup>74].

En los años 60 ya existían prototipos de sistemas basados en la detección de los desfases en tiempos de llegada, desarrollados en el mismo Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington, el Laboratorio de Investigación Naval y en el Instituto de Oceanografía de Woods Hole. También se podían encontrar ya otros prototipos de sistemas basados en medidas de distancia, obtenidas con la respuesta a un ping por diversos respondedores en el fondo marino, usados por la Marina de los Estados Unidos, el Instituto de Oceanografía Scripps y el propio Woods Hole [HMM<sup>+</sup>74].

Actualmente el posicionamiento en la superficie del mar, de un río o un embalse, se soluciona comúnmente gracias al uso del GPS. Sin embargo, el posicionamiento por GPS solo es válido para nodos superficiales, dada la mala transmisión de las señales electromagnéticas en agua. Esto solventaría el posicionamiento de nodos en la superficie del agua, pero es inviable para nodos sumergidos, puesto que tendrían que emerger periódicamente para obtener su posición, y navegarían a ciegas una vez sumergidos, salvo que se emplee alguna técnica auxiliar.

El posicionamiento en la superficie del mar mediante GPS se lleva realizando desde la década de los 90, como muestra el estudio de Lachapelle *et al.* [LCLL96], donde se comparan los resultados proporcionados por varias antenas GPS para obtener la orientación de un barco con los datos de sensores inerciales (en este caso, giróscopos), obteniendo precisiones de minutos de arco, muy por debajo del umbral requerido para estas aplicaciones. Uno de los trabajos más recientes es el de Lee *et al.* [LLL<sup>+</sup>11], en el que emplean receptores GPS para medir la posición de distintos nodos de bajo coste, utilizando esta información para obtener un mapa de las corrientes de agua en un río.

El posicionamiento para nodos sumergidos sigue siendo un campo de investigación muy activo. Actualmente existen numerosas alternativas para estimar la posición de un nodo en entornos subacuáticos, cada una de las cuales presenta diversas ventajas e inconvenientes y que han sido exploradas con distinta intensidad a lo largo de estos años. A continuación se van a recoger algunas de las más relevantes, y para ello se va a distinguir entre los sistemas de posicionamiento acústico subacuático, otros sistemas de posicionamiento basados en sensores inerciales o de visión, y finalmente los sistemas de posicionamiento basados en fusión de tecnologías.

### 2.3.1. Sistemas de posicionamiento acústico

Las ondas acústicas son las que presentan mejores propiedades de propagación en el agua, por lo que son una solución muy versátil en los sistemas de posicionamiento subacuático. Un ejemplo serían los sistemas basados en comparativa de campos (*Matched-Field Processing*, MFP), en los cuales se pretende localizar a una fuente emisora comparando el campo acústico recibido en un array de hidrófonos con los resultados de un modelo de propagación. En el modelo se prueban distintos rangos y profundidades, y se busca la solución que mejor se ajusta a los datos reales [Buc76], obteniendo así una estimación de la posición del emisor respecto al array.

Otra opción es comparar el patrón de llegadas con un modelo de propagación de trazado de rayos, identificando así la posición del receptor [Def94, JPS<sup>+</sup>00]. La desventaja de estos sistemas que obtienen la posición del nodo utilizando un modelo de propagación, es que hay que conocer con precisión todos los parámetros del entorno en el área a estudiar para que la salida del modelo sea lo más fiable posible. Además, los tiempos de cómputos del modelo deben ser suficientemente rápidos, dependiendo de las necesidades de la aplicación.

Con la excepción de los sistemas MFP y de manera general, la amplia mayoría de sistemas que emplean señales acústicas se clasifican en dos grandes grupos: los sistemas de muy larga base *long baseline* (LBL) y los sistemas de base corta *short baseline* (SBL) o ultra corta *ultra-short baseline* (USBL).

#### A. Sistemas LBL

Los sistemas LBL obtienen su posición respecto a una serie de balizas ubicadas en el fondo marino, mediante la obtención de al menos tres medidas de rango, como se representa en la figura 2.5. Estas balizas están separadas unas distancias que pueden variar desde centenares de metros a kilómetros [Vic98].

Las principales ventajas de estos sistemas son la buena precisión, la posibilidad de obtener medidas redundantes, siempre que haya observaciones respecto a más de tres balizas, y que no necesitan sensores adicionales para obtener su posición absoluta. Como contrapartida, requiere el despliegue de varias balizas en el fondo del mar, lo que es costoso en tiempo y dinero, además de ser necesaria también una fase de calibración.

Este tipo de sistemas surge fundamentalmente en los años 70, empleándose en muchos casos para posicionamiento superficial, cuando todavía no existía GPS. Entre los trabajos más notables se encuentra el de Heckman y Abbott, donde se presenta un sistema con respondedores sumergidos en posiciones conocidas, cuyas distancias son estimadas desde el barco mediante una serie de medidas, y que son utilizadas posteriormente para obtener la posición del propio barco [HA73].

Hunt *et al.* presentan un sistema donde un barco está equipado con un emisor y un

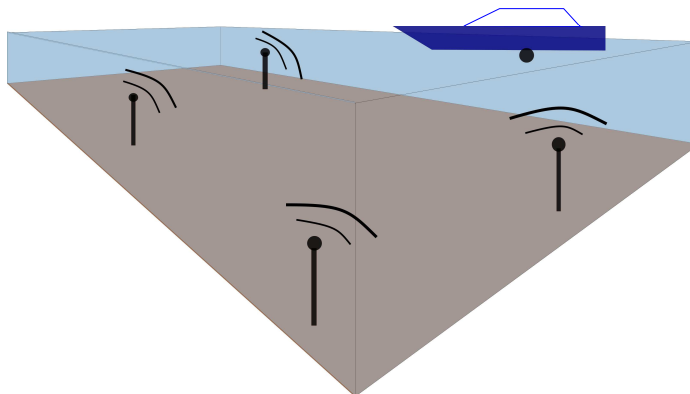


Figura 2.5: Despliegue típico de un sistema LBL

receptor [HMM<sup>+</sup>74]. El transductor emite un ping, que es recibido por distintas balizas sumergidas, respondiendo cada una de ellas a una frecuencia diferente, siendo recibidas por el barco posteriormente. La posición se calcula mediante mínimos cuadrados no-lineales (*Non-linear Least-squares*), y comentan que también se puede utilizar el sistema para posicionar vehículos sumergibles, no únicamente barcos en la superficie.

El sistema de posicionamiento de Spindel *et al.* consta de varios nodos sumergidos y anclados, en posiciones conocidas [SPMD76]. El objetivo es igualmente posicionar un barco en la superficie. Éste envía un ping acústico que es respondido por las balizas, cada una a una frecuencia diferente para identificarlas, permitiendo así obtener las distancias a cada una de ellas. El sistema puede funcionar también utilizando el efecto Doppler, con las balizas emitiendo un tono en modo continuo.

Ya en la década de los 90 aparecen sistemas LBL para AUV como el de Atwood *et al.*, que presenta un doble funcionamiento [ALBM95]. Por un lado, tiene un modo maestro en el que el AUV obtiene su posición gracias a varias balizas con las que obtiene las respectivas distancias; y tiene también otro modo respondedor, donde se puede obtener la posición del AUV en un barco, si lo que interesa es tenerlo ubicado en la plataforma de control. Durante esta década también se pueden encontrar sistemas comerciales, como el desarrollado por la compañía iMetrix. El sistema operaba a una frecuencia de 300 kHz en un rango de 100 m, obteniendo precisiones del orden de centímetros [LBSF98].

Con el desarrollo de los sistemas USBL y los basados en fusión de tecnologías en la década de los 90, los sistemas LBL fueron perdiendo popularidad, ya que el despliegue de los nodos anclados al fondo con su consiguiente calibrado es muy costoso, y los otros sistemas solventaban este problema.

No obstante, todavía existen trabajos recientes relacionados con este tipo de sistemas. Melo y Matos presentan un sistema de guiado y control de un vehículo autónomo de superficie (*Autonomous Surface Vehicle, ASV*) [MM08]. Este vehículo debe seguir a un AUV con una determinada trayectoria, minimizando la distancia relativa entre los dos. La

posición global del AUV se calcula gracias a un sistema LBL de dos balizas, que permite obtener la posición en el plano asumiendo entonces que la profundidad es despreciable. Para calcular las distancias del AUV a cada baliza y distinguir la señal de cada una de ellas, se emplean frecuencias diferentes en la interrogación, dependiendo de la baliza. Se aplica un filtro de Kalman y un método de mínimos cuadrados para refinar los resultados, obteniendo diferencias entre las trayectorias del AUV y AUS de entre 10 y 20 metros.

Santos, Matos y Cruz utilizan un sistema LBL en el que las balizas de referencia son embarcaciones superficiales autónomas (*Autonomous Surface Crafts*, ASC) [SMC08]. Esto permite mover el sistema de referencia a una posición nueva y evitar así la necesidad de desplegar más boyas fijas para realizar experimentos en distintas posiciones, como puede ser por ejemplo a lo largo de un río. Para ello, el AUV que se posiciona debe tener en cuenta el cambio de sistema de coordenadas, ubicándose siempre de manera relativa a los ASC, y teniendo que calcular de nuevo la distancia que mantienen los dos ASC entre sí, que puede variar de un sistema a otro. Los errores en la navegación del AUV oscilan en pocas decenas de metros.

Finalmente, Xu, Guo y Dutkiewicz presentan un sistema para obtener la posición de nadadores en una piscina [XGD10]. Para ello, el nadador manda una señal acústica que es recibida en diversos nodos desplegados por la piscina, obteniendo errores del orden de decenas de centímetros.

## B. Sistemas SBL y USBL

Los sistemas SBL y USBL se basan en la medida de desfases en los tiempos de llegada, en lugar de tiempos de llegada absolutos, empleando para ello un array de receptores con un mínimo de tres elementos. Con estos desfases se puede obtener el ángulo de llegada de la señal acústica, y utilizando adicionalmente una medida de tiempo de vuelo, se podría ubicar al emisor. Los sistemas SBL y USBL se diferencian en la distancia entre los distintos elementos del array, siendo del orden de decenas de metros en el caso de sistemas SBL, y de decenas de centímetros para los sistemas USBL [Vic98].

Estos sistemas se pueden equipar en barcos, distanciando los elementos del array de manera diferente en uno y otro caso, ubicando dichos elementos en los extremos del barco en los sistemas SBL, y con una configuración más compacta en los sistemas USBL. Un ejemplo típico de sistema SBL se muestra en la figura 2.6, donde se han representado distintas balizas ubicadas en los extremos del casco de un barco, y un AUV que recibiría las señales emitidas por ellas.

Son sistemas sencillos de montar, al ser usados en un barco y no estar sumergidos en el fondo del mar. Proporcionan buenas estimaciones de distancia usando los tiempos de vuelo, y los datos se pueden actualizar a una frecuencia aceptable. Como contrapartida, en aguas profundas requieren que la distancia entre ellos en el barco sea elevada (más de 30

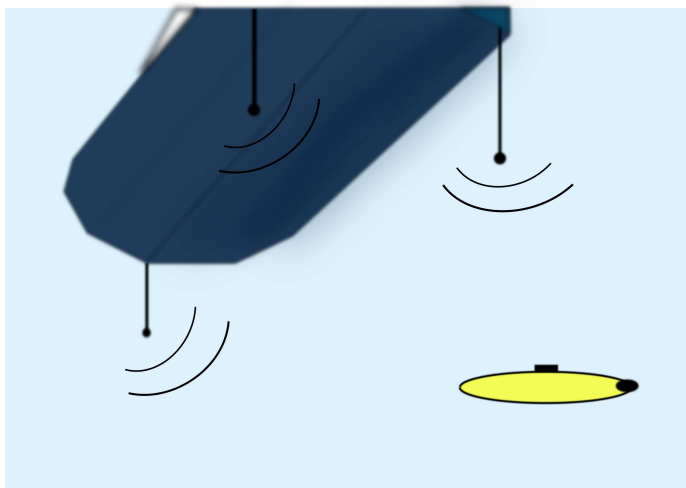


Figura 2.6: Despliegue típico de un sistema SBL

metros, debido a un problema geométrico de distribución de balizas), y es necesaria una compleja fase de calibrado tanto fuera del agua, como una vez en el mar antes de empezar a medir. Además, y la posición absoluta depende de sensores adicionales, puesto que hay que usar una Unidad de Referencia Vertical (*Vertical Reference Unit*, VRU) y otra de rumbo (*Heading Reference Unit*, HRU) para corregir los tres ángulos que tiene el barco que porta el sistema. Hay que tener en cuenta también que es necesario que el barco siga al objeto que quiere posicionar, por lo que su uso se ve restringido a ciertas aplicaciones.

Los sistemas SBL y USBL comenzaron a proliferar principalmente a partir de la década de los 80. Mitome, Koda y Shibata proponen uno de los primeros sistemas de este tipo en 1985, aunque con un funcionamiento inverso [MKS85]. Un transductor sumergido manda una señal modulada en frecuencia, que es detectada con un array en el barco. Con este array se detecta tanto la distancia al transductor como los distintos ángulos, lo que permite obtener la posición de éste respecto al transductor. Para ello, el sistema necesita conocer la profundidad del entorno, por lo que son necesarias medidas adicionales, así como correcciones por el efecto de las mareas.

Estos sistemas encuentran un nicho de actuación importante en las aplicaciones de *homing*, en las que se requiere que el robot acuda a un punto determinado. Un sistema de este tipo es el propuesto por Bellingham *et al.*, utilizado en entornos árticos [BLV<sup>+</sup>95]. El AUV usa un sistema LBL para navegar, pero para recogerlo se hace uso de un sistema USBL comercial implementado en el AUV.

Singh *et al.*, utilizan un sistema USBL en un AUV para acoplarlo a un amarradero [SCE<sup>+</sup>96]. Faria de Lima y Furukawa utilizan un sistema USBL para guiar a un AUV hacia la posición de un respondedor de posición conocida, que en un caso práctico estará acoplado a un objeto a rescatar del fondo marino [dLF10]. Para ello, realiza el procesamiento de la

señal a bordo del AUV utilizando un microprocesador y una FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Hay que destacar también que los sistemas de Singh y de Lima emplean códigos Barker para aprovechar las ventajas de las técnicas CDMA, como es obtener más precisión en las medidas.

Otros ejemplos de sistemas USBL pueden encontrarse en el trabajo de Mian, Ishimatsu y Nagashima [MIN00] y el de Watanabe, Ochi y Shimura [WOS08], donde se resalta el uso de secuencias-m para la obtención de los tiempos de vuelo con mayor precisión. Por su parte, Shimoo, Nagashima e Ishimatsu [SNI09] utilizan dos hidrófonos de referencia que emiten una ráfaga acústica consistente en una señal modulada a dos frecuencias diferentes. Esta señal llega a un AUV que las recibe y calcula su posición en función de las diferencias de fase. El sistema se probó en un tanque de pruebas, proporcionando errores menores que 10 cm.

### 2.3.2. Sistemas de posicionamiento subacuático no acústicos

#### A. Navegación por estimación

Una de las técnicas más sencillas y ampliamente utilizada es la navegación por estimación (*dead reckoning*), en la que se mide con un sensor una magnitud. Esta magnitud puede ser la aceleración, en el caso de sistemas INS (*Inertial Navigation System*), el vector velocidad respecto al suelo, usando un sónar Doppler o DVL (*Doppler Velocity Log*), o el vector velocidad respecto al agua, usando un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) [LBSF98]. Midiendo la aceleración o la velocidad y conociendo la posición inicial, el nodo podría obtener su posición actual.

Estos sensores proveen una información que es fácilmente medible y no necesitarían de la acción de sensores externos, aunque están sujetos a incertidumbres crecientes en el tiempo y no acotadas, provocadas por el ruido en la medida y la no linealidad de los sensores. Adicionalmente, los sensores inerciales son muy caros y consumen mucha batería [EWSG07].

Un ejemplo de este tipo de sistemas sería el descrito por Uliana, Andreucci y Papalia [UAP97]. En dicho trabajo se presenta un sistema de navegación asistida por Doppler para un AUV cuya misión tiene lugar bajo la capa de hielo del Antártico. Para ello integra los datos de un IMU (*Inertial Measurement Unit*), que son acelerómetros y giróscopos que proporcionan rotación y aceleración, con un sónar Doppler mediante un filtro de Kalman.

Más recientemente, [Sta12] presenta en una tesis doctoral un estudio sobre el ajuste de diferentes sensores *in situ*, el uso de perfiles de corrientes con un *Doppler Current Profiler* para mejorar la navegación por estimación, y la mejora mediante el uso de un modelo de fusión de datos provenientes con cierto retraso en un filtro de Kalman para la navegación.



## B. Técnicas de visión: navegación por mapa de terreno y localización y mapeado simultáneos

El medio subacuático es muy hostil para las técnicas de visión por computador, debido a la absorción y el *scattering* que sufren las ondas electromagnéticas a esas frecuencias, así como otros problemas debido al rango de actuación de estos sistemas o los problemas derivados de una iluminación muy irregular y cuyos efectos son complicados de controlar.

No obstante, en los últimos años ha surgido un interés creciente en las aplicaciones de navegación por mapa de terreno (*Terrain-based Navigation*) y de localización y mapeado simultáneos (*Simultaneous Localization And Mapping*, SLAM). Para los AUV o ROV suponen una técnica de posicionamiento que no depende de ningún agente externo, lo que facilita su despliegue y operación de manera prácticamente inmediata, y suponen una alternativa a los sistemas basados en *dead-reckoning*, cuyos errores no están acotados.

Se suele considerar que el planteamiento teórico de este tipo de sistemas surgió entre la década de los 80 y los 90 del siglo pasado, gracias a los trabajos de Smith y Moutarlier [DWB06, KEW06]. La técnica de navegación por mapa de terreno utiliza la información obtenida por los sensores en tiempo real, junto a un mapa del entorno, conocido *a priori*, que suele ser de información topográfica. Comparando los datos obtenidos con el mapa disponible, se puede estimar la posición del vehículo en el mapa. Por otra parte, en la técnica SLAM el nodo parte de una posición desconocida en un entorno igualmente arbitrario, y mediante las sucesivas medidas del entorno es capaz de establecer distintos puntos de referencia, a partir de los cuales puede obtener su posición. Adicionalmente, con las sucesivas medidas se puede obtener también la posición de los puntos de referencia.

El desarrollo de este tipo de sistemas comenzó a aumentar a finales de la década de los 90, donde se podría destacar especialmente el trabajo de Smith, Leonard, Bennett y Shaw [SLBS97]. En él proponen un sistema donde se utilizan las medidas de sensores para obtener el mapa de un entorno (no conocido *a priori*), con el objetivo de localizar al AUV en ese mapa gracias a la detección de puntos de interés en los mapas obtenidos.

Di Massa y Stewart Jr. [MJ97], presentan un nuevo algoritmo que obtiene la posición en función de distintas posibles localizaciones, asignándole distintos pesos posteriormente de manera probabilística en función de técnicas de minería de datos (*data association techniques*). Newman y Durrant-Whyte fusionan el uso de un IMU con un sónar para detectar puntos de interés en un mapa del terreno y corregir las medidas del IMU, integrando estas medidas con un filtro de Kalman [NDW98].

Ejemplos más recientes del uso de este tipo de sistemas se pueden encontrar en el trabajo de Williams y Mahon [WM06], en el que proponen un sistema de estas características para ayudar a la navegación de un vehículo subacuático, en este caso para realizar un seguimiento en un puerto. Para ello parte de medidas de profundidad y un mapa de la batimetría del puerto, apoyándose en un filtro de partículas para la estimación.

### 2.3.3. Sistemas de posicionamiento basados en fusión de tecnologías

La fusión de tecnologías es una solución que en los últimos años ha cobrado gran interés en la comunidad científica, al aprovechar las características de diversos sensores, cuyas prestaciones han mejorado con los años, presentando sistemas más robustos y con mayor rango de cobertura y resolución [LSC02]. Combinando distintos sensores que se corrigen mutuamente cuando se encuentran en una situación desfavorable, se mejoran las prestaciones del sistema final, aunque se aumenta el coste total y la complejidad. Se pueden encontrar diversos sistemas basados en fusión de datos de múltiples sensores, como por ejemplo sistemas equipados con GPS y transductores acústicos, sistemas con GPS y sensores INS o sistemas que combinan sensores acústicos y ópticos.

Los trabajos relacionados con este campo comenzaron a desarrollarse a principios de la década de los 90. Bell *et al.* presentan uno de los primeros trabajos en 1991 [BHMS91]. Consiste en un sistema que pretende posicionar los hidrófonos que penden de un barco. Para ello se despliegan además dos boyas en el mar, donde tanto el barco como las boyas están equipadas con GPS. Se toman medidas acústicas provenientes del barco y de las boyas, tanto en montaje LBL como USBL, así como la señal de distintos sensores de profundidad, combinando todo con un filtro de Kalman.

Youngberg propuso en 1992 el concepto de boyas en el mar equipadas con GPS, utilizando posteriormente señales acústicas bajo el agua para enviar información a un móvil [You92], tal y como ilustra la figura 2.7. Un concepto similar lo propone Thomas [Tho98], presentando lo que denomina boyas GIB (*GPS Intelligent Buoys*). En este trabajo, un conjunto de boyas mide el tiempo de vuelo de un móvil y posteriormente mandan a una unidad central su posición y el tiempo de vuelo registrado, pudiendo calcular entonces la posición del móvil.

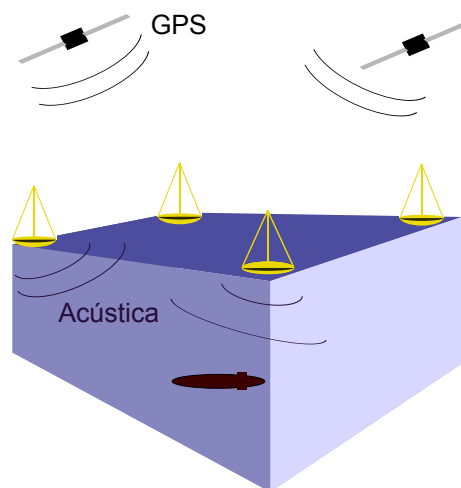


Figura 2.7: Sistema de posicionamiento basado en boyas con GPS y transductores acústicos como el descrito en [You92]

Vaganay, Bellingham y Leonard realizan un estudio de un sistema que fusiona acústica, en concreto mediante el uso de un sistema LBL, con *dead reckoning* [VBL98]. Este sistema puede funcionar en dos modos diferentes: en el primero, se utiliza el sistema LBL para resetear la posición obtenida por *dead reckoning*, mientras que este último provee de una zona de validez de medidas, sirviendo como detector de datos espurios. En el segundo, la posición se estima por *dead reckoning* y es corregida en función de las medidas acústicas usando un filtro de Kalman.

Whitcomb *et al.* también utilizan un sistema LBL, pero lo fusionan con un DVL [WYSM98]. La conclusión a la que llegaron es que la fusión de ambos datos mejora las prestaciones de ambos sistemas por separado. En el trabajo de Marthiniussen, Faugstadmo y Jakobsen se puede encontrar un sistema parecido [MFJ04]. En este caso se tiene un sistema comercial que fusiona sensores INS (acelerómetros en este caso) con acústica. La estimación de la posición con los sensores inerciales se puede corregir mediante el uso de un sistema de posicionamiento acústico, ya sea LBL (para lo que necesitaría desplegar nodos sumergidos previamente) o en modo USBL. La integración se realiza mediante un filtro de Kalman.

Otros ejemplos más recientes fusionando acústica con *dead reckoning* se pueden encontrar en el trabajo de Morgado *et al.* [MOSV07], donde se combina la información proporcionada por un sistema USBL con sensores inerciales y un filtro de Kalman extendido (*Extended Kalman Filter*, EKF). Yoerger, Jakuba, Bradley y Bingham muestran el desarrollo de un AUV para explorar el fondo marino y obtener datos importantes de campo magnético y valores hidrotérmicos del agua [YJBB07]. Para tener localizado al AUV se emplea un sistema de posicionamiento que utiliza LBL mientras se sumerge el AUV, pasando a medidas Doppler respecto al fondo cuando se encuentra a menos de 300 metros de éste.

Ferreira, Matos y Cruz [FMC10] proponen un sistema en el que un AUV obtiene su posición gracias a la medida de distancia respecto a una boya de referencia mediante señales acústicas para obtener la posición en el plano, y se usan la información de una brújula y un sensor de profundidad para obtener la orientación y la profundidad del AUV. El objetivo es una aplicación de *homing*, en el que el AUV pueda saber dónde está y encaminarse hacia la boya de referencia. Las medidas se integran con un filtro EKF.

Otros sistemas fusionan los datos obtenidos con un GPS con sensores inerciales o DVL, como los trabajos propuestos por An *et al.* [AHPS97] y del sistema comercial SEADeViL [Jr.02]. En ambos casos, el sistema de posicionamiento combina las medidas de GPS, en modo normal o diferencial, con un DVL y sensores INS.

En el trabajo de Yun *et al.* se detallan los avances del dispositivo denominado SANS (*Small Autonomous Underwater Vehicle Navigation System*) [YBM<sup>+</sup>99]. Éste se basa en medidas GPS en superficie, apoyadas por un INS y diferentes sensores que miden propiedades como la velocidad del agua, sensores de profundidad o brújulas. De esta forma se puede conocer cómo se mueve el objeto cuando se sumerge, entre dos medidas sucesivas

obtenidas con el GPS, momento en el cual corregiría su posición. En este trabajo se prueba el dispositivo en un carrito de golf, no aparecen pruebas en entornos reales.

McEwen *et al.* comprueban el funcionamiento de un AUV en el ártico [MTWP05]. Este AUV incorpora GPS, INS, DVL y un sistema de referencia de inclinación y orientación (*Attitude and Heading Reference System*, AHRS), que toma medidas del campo magnético, destacando los problemas ocasionados por la peculiar forma del campo magnético a estas latitudes.

En el trabajo de Medagoda *et al.* se aborda el problema de la deriva de errores en AUV que tienen que realizar misiones a gran profundidad [MJPW10]. En estas misiones el AUV tiene que navegar por una gran columna de agua donde no puede hacer uso del GPS o del DVL. Para solucionar este problema hace uso de un ADCP, aprovechando que los perfiles de corrientes en las columnas de agua son estables en el tiempo, consiguiendo reducir la deriva del error en el tiempo considerablemente.

Liu, Chitre y Rui obtienen la posición mediante la combinación de las medidas obtenidas por GPS, un IMU y un DVL, con distintos filtros como son el de Kalman, de partículas o un filtro modificado de partículas [LCR10]. La idea es no depender de ningún elemento externo al AUV, para facilitar así el despliegue en un entorno cualquiera donde se quiera trabajar. Yuliang *et al.* presentan un sistema de seguimiento de una boya en la superficie, con el objetivo de medir la corriente en un río [YFBJ10]. Para ello utilizan tecnología GPS, un sensor inercial para medir el curso que sigue la boya, una brújula digital y una unidad de referencia de movimiento (*Motion Reference Unit*), que se encarga de medir el cabeceo, alabeo y la guiñada. Tras realizar una calibración de los distintos sensores, se libera la boya en el río, y se recoge en otro punto, corriente abajo, momento en el que se vuelve a realizar una calibración y se recogen los datos para su procesado.

El sistema comercial desarrollado por la compañía iXSea, denominado GAPS, combina USBL con sensores inerciales y GPS [Aud04]. Posteriormente, la compañía ha ido desarrollando otros módulos de posicionamiento acústico y sensores inerciales, dando pie a una gama más amplia de sistemas de posicionamiento y navegación [WMPH09]. Kussat, Chadwell y Zimmerman proponen un sistema en el que se emplean unos transpondedores en el fondo que son posicionados con la ayuda de un barco, cuya ubicación se conoce por GPS [KCZ05]. Una vez que se conoce la posición de los transpondedores, estos se usan para obtener la posición de un AUV.

En el trabajo de Alcocer, Oliveira y Pascoal se describe un sistema de posicionamiento consistente en cuatro boyas en superficie que reciben una señal de un objeto sumergido de forma periódica [AOP07]. Todo el sistema está sincronizado mediante GPS previamente a su despliegue, y el seguimiento del objeto sumergido se hace mediante un filtro EKF para solventar pérdidas de recepciones de los pings emitidos por el objetivo, así como los datos espurios que tienen lugar en la estimación de las distancias mediante señales acústicas.

Erol, Vieira y Gerla presentan un sistema de posicionamiento basado en boyas

“Dive’N’Rise” (DNR) [EVG07b]. Las boyas conocen su posición por GPS y se sumergen, transmitiendo esta información, que llegará a los nodos. Estos calculan las distancias a las boyas calculando el tiempo de vuelo, asumiendo un sistema perfectamente sincronizado. Las boyas pueden emerger de nuevo y actualizar su posición.

En el sistema de Almeida, Cruz y Matos se presenta un sistema de boyas sincronizadas llamadas SIB (*Synchronized Intelligent Buoy*) [ACM10]. Estas boyas constan de receptores GPS y de un bloque formado por un emisor y un receptor acústicos. Las boyas se sincronizan previamente al experimento. Estos receptores pueden discriminar hasta ocho señales de distintas frecuencias, que identificarían a cada uno de los distintos nodos, y pueden tener además umbrales de detección diferentes, ajustando este umbral en la fase de calibración, en la cual las boyas determinan la configuración de funcionamiento más favorable.

En el sistema de Carroll *et al.* se usan boyas con tecnología GPS que les permite sincronizarse entre sí [CZZ<sup>+</sup>10]. A intervalos regulares, estas boyas emiten su posición y el instante de tiempo en el que se realiza la emisión mediante un prototipo de módem basado en OFDM. Estas emisiones son escuchadas por nodos sumergidos, que obtienen una estimación de los tiempos de vuelo comparando el tiempo de emisión, que viene incluido en la señal, con el suyo propio en el momento de recibirlo. Se utilizan las diferencias de tiempos de vuelo de las señales, mediante las cuales se obtienen las distancias entre nodos mediante una búsqueda exhaustiva y de la posición del nodo receptor mediante mínimos cuadrados.

Otra opción para obtener la posición en una red de sensores es emplear un AUV cuya posición es conocida. En otro sistema desarrollado por Erol, Vieira y Gerla se tienen varios sensores de una red esparcidos por un entorno tridimensional [EVG07a]. Un AUV ayuda a localizarlos partiendo de una posición conocida por GPS, bajando a una profundidad fija y siguiendo una trayectoria predefinida marcada por una brújula y *dead-reckoning*, a la vez que intercambia mensajes acústicos con los nodos. Éstos se ubican en el plano XY por los mensajes intercambiados, mientras que la profundidad viene dada por un sensor de presión. Los mensajes consisten en una estimación de la distancia mediante tiempos de ida y vuelta (*Round-trip Time-of-flight*, RTOF), para lo cual tiene dos alternativas: solapamiento de rectángulos (*bounding box*) y triangulación. Teniendo en cuenta los mejores resultados presentados, para solapamiento de rectángulos los errores en la posición rondan los 30 metros, mientras que para triangulación bajan a 10 metros. Como contrapartida, de localizar el 90 % de los nodos se pasa al 35 %.

Un esquema similar es propuesto por Waldmeyer, Tan y Seah, donde un AUV conoce su posición por GPS, se sumerge a una profundidad establecida y mediante una ruta preprogramada y la emisión de señales acústicas permite posicionar al resto de nodos en el plano XY [WTS11]. Para ello se asume que los nodos conocen su profundidad (por ejemplo, mediante un sensor de presión). Tras tres emisiones del AUV en puntos diferentes, donde cada nodo calcula el tiempo de llegada de la señal proveniente del AUV, cada nodo podría calcular su posición por triangulación. Los nodos localizados pueden entonces ayudar al

resto a posicionarse.

Uno de los sistemas más completos para la localización de un AUV es el propuesto por Jalving, Gade, Hagen y Vestgård [JGHV03]. El AUV dispone de un INS que calcula la posición, velocidad e inclinación a partir de los datos de un IMU (acelerómetros y giróscopos). Se pueden usar también un DVL y sensores de profundidad, integrando todo con un filtro de Kalman. Además se podría ayudar de medidas por GPS para corregir errores de los sensores inerciales, de un sónar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Sonar*, SAS), un sistema LBL o SBL, o navegación por mapa de terreno midiendo la batimetría. Otro sistema que integra gran cantidad de sensores es el desarrollado por la compañía Bluefin Robotics para sus AUV [PT11]. Estos AUV van equipados con IMU, brújulas magnéticas digitales, DVL, GPS, sensores de profundidad, sensores de velocidad del sonido e INS. La integración de todos estos datos permite la navegación del AUV en entornos diversos.

Por último, destacar el sistema de Myagotin y Burdinsky, que fusiona acústica y visión [MB10]. En su propuesta, un sistema de posicionamiento acústico basado en tiempos de vuelo se usa para guiar a un AUV a una posición deseada. Al acercarse a ella y ser reconocido por cámaras, se emplea otro algoritmo basado en visión, que finalizaría la misión.

## 2.4. Objetivos planteados

Tal y como se ha recogido en la sección anterior, existen actualmente varias alternativas para obtener la posición de un nodo en entornos subacuáticos, donde cada una de ellas presenta diversas ventajas e inconvenientes y que han sido exploradas con distinta intensidad a lo largo de estos años.

En general, en todas ellas el gran problema consiste en la localización en el plano XY. Esto se debe a que como consecuencia de la peculiaridad de este entorno, en el que las distancias pueden ser muy elevadas respecto a la profundidad, se tiene mucha incertidumbre en la estimación de esta última variable, por lo que se suelen emplear sensores de presión, que estiman la profundidad sin ninguna ayuda externa adicional. La estimación de la posición es crítica cuando el nodo se encuentra sumergido, donde no puede hacer uso del GPS, y más concretamente en la columna de agua, lejos del fondo, donde no puede estimar su posición con un DVL o por navegación terrestre o SLAM. En esta zona intermedia, la estimación por sensores acústicos o sensores inerciales es todavía la única alternativa posible [KEW06], y sigue siendo un campo de gran actualidad.

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de un modelo de propagación acústica en entornos subacuáticos, que se aplicará al estudio y diseño de un sistema de posicionamiento subacuático que permita el posicionamiento de nodos en entornos tridimensionales y que sea lo más versátil posible frente a la casuística particular presente en este tipo de entornos. El desarrollo de esta tesis se ha estructurado en tres bloques temáticos:

- Análisis detallado de toda la fenomenología asociada a la propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos.
- Desarrollo de un modelo de propagación acústica subacuática que permita simular el comportamiento de esta propagación de una manera realista, en función de la fenomenología estudiada.
- Propuesta de sistema de posicionamiento acústico subacuático y estudio de su funcionamiento considerando distintos esquemas de codificación y algoritmos de posicionamiento para diversas situaciones medioambientales que pueden afectar a la propagación de las ondas acústicas.

La primera fase del análisis a realizar en esta tesis consistirá en estudiar los fenómenos físicos presentes en la propagación acústica en el agua, para entender así qué mecanismos afectan a dicha propagación y bajo qué condiciones. La intención es discriminar entre los efectos más y menos relevantes, identificando aquellos efectos globales que aparecen en todo tipo de propagaciones, y otros más locales que únicamente aparecen bajo ciertas condiciones o entornos geográficos concretos.

Una vez que se han identificado los fenómenos más importantes que hay que considerar en la propagación acústica subacuática, se plantea como segundo objetivo concreto el desarrollo de un modelo de propagación acústica subacuática. Dada la gran complejidad que presenta realizar pruebas experimentales en este tipo de entornos, los modelos de propagación son claves para obtener estimaciones del comportamiento de un sistema, así como la optimización de los mismos. Este modelo debe considerar la fenomenología más relevante de la propagación acústica en entornos subacuáticos, de manera que represente lo más fielmente posible la realidad. Además, su rango de aplicación debe ser extenso, de manera que se pueda usar bajo el mayor número de condiciones ambientales posible. El modelo de propagación deberá ser validado experimentalmente para comprobar su correcto funcionamiento.

Mediante el uso del modelo de propagación acústica subacuática desarrollado se puede estudiar el comportamiento del sistema de posicionamiento propuesto. Este sistema considera una serie de nodos en la superficie del mar o río (boyas o barcos) equipados con GPS, es decir, cuyas posiciones son conocidas. Estos nodos portan transductores acústicos que les permitan enviar y recibir señales con nodos sumergidos (AUV, ROV, etc.). A diferencia de otros sistemas de posicionamiento acústicos, estas señales estarán codificadas para mejorar la exactitud de la estimación de los tiempos de vuelo, aumentar la robustez frente al ruido y permitir la recepción simultánea de señales provenientes de distintos nodos, evitando así esquemas basados en TDMA, que se ven seriamente afectados por los tiempos de propagación que pueden tener lugar en estos entornos. Adicionalmente, el uso de GPS en los nodos superficiales permite prescindir de la fase de calibrado necesaria también en otros tipos de sistemas acústicos.

El análisis del sistema propuesto se realizará a través del modelo de propagación desarrollado. En primer lugar se realizará una comparativa de distintos esquemas de codificación, para seleccionar aquel que presente mejores prestaciones en este medio. Posteriormente se estudiará la influencia de distintos efectos del canal en la estimación de la distancia entre dos nodos empleando señales acústicas codificadas, y a continuación se abordará el estudio del desempeño de distintos algoritmos de posicionamiento bajo diversas condiciones. El objetivo de esta fase es discernir cuál de los algoritmos estudiados es óptimo en lo que respecta a exactitud de sus resultados, así como comprobar cómo se ven afectados por distintas configuraciones y efectos del canal.



## Capítulo 3

# Estudio y modelado de la propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos

En el capítulo 2 se ha puesto de manifiesto la importancia de los modelos de propagación acústica subacuática. Esta importancia reside principalmente en dos aspectos claves. Por un lado, proporcionan una estimación de la propagación acústica que está teniendo lugar en el medio bajo unas determinadas condiciones ambientales, información que es de vital importancia en diversas aplicaciones. Por otro lado, el uso de modelos de propagación resulta una primera aproximación al estudio y el desempeño de sistemas más complejos. Este estudio no siempre es posible hacerlo con pruebas reales, debido al coste económico y a la dificultad logística que presentan las pruebas en este medio, o a la imposibilidad de controlar ciertos parámetros ambientales que pueden afectar a su funcionamiento.

Los diversos estudios realizados desde la década de los años 30 del siglo pasado sobre la propagación acústica en este entorno y los efectos asociados a ella, han servido para el desarrollo de distintas técnicas matemáticas que reproducen la propagación de las ondas acústicas en entornos subacuáticos. Estas técnicas pueden modelar diversos fenómenos de una forma análoga, por ejemplo implementando la misma ecuación de velocidad del sonido, pero difieren en su rango de aplicación, no siendo válidas generalmente para todo tipo de dimensiones del entorno, o para los mismos rangos de frecuencia de la señal emitida.

Una introducción a los fundamentos, los rangos de aplicación y las ventajas e inconvenientes de las principales técnicas matemáticas para modelar la propagación acústica en entornos subacuáticos se puede encontrar en [Apa09], donde se mostraron simulaciones obtenidas con cuatro modelos de propagación diferentes, cada uno de ellos basado en una de las cuatro técnicas principales: trazado de rayos, modos normales, ecuación parabólica e integración espectral.

A raíz de este estudio y teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo, donde se han empleado señales ultrasónicas codificadas mediante técnicas CDMA, se ha optado por el uso de la técnica de trazado de rayos. Esta técnica es la más indicada para modelar el comportamiento de señales acústicas de frecuencias del orden de decenas de kilohercio y superiores, y que además presenten un elevado ancho de banda.

A pesar de que existen numerosos modelos de propagación basados en trazado de rayos, tal y como se ha recogido en la sección 2.1.1, se ha optado por desarrollar un modelo propio, siendo éste uno de los objetivos y contribuciones fundamentales de esta tesis. El motivo de esta decisión reside en el hecho de que no todos los modelos que se han referenciado están disponibles al público. De los modelos que sí lo están, se detectó que su rango de aplicación no era el adecuado para los problemas que se querían abordar, debido a la validez de las ecuaciones implementadas o a la ausencia de efectos que se consideraron relevantes, como el desvanecimiento y el ensanchamiento Doppler provocado por el oleaje asociado al viento en la superficie, que tendrá un efecto determinante sobre las señales codificadas.

Como el considerar estos cambios supondría la modificación de un código que no está disponible generalmente, se optó por el desarrollo de un modelo de propagación propio que recogiera todos los efectos deseados y que a la vez, fuera lo más genérico posible gracias a las ecuaciones y efectos implementados. De esta manera, su rango de validez y su propósito general le permitirá poder ser utilizado en el futuro en más aplicaciones que las estudiadas en este trabajo, como por ejemplo, aplicaciones de comunicaciones subacuáticas, ya que modela la propagación acústica entre dos puntos en un entorno cualquiera.

Para desarrollar un modelo de propagación es necesario realizar un estudio de la fenomenología presente en el medio, de manera que se pueda discernir qué efectos son los más relevantes y por consiguiente, cuáles son los que hay que considerar en el modelo. En este capítulo se llevará a cabo el estudio de la fenomenología presente en la propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos, así como la implementación de dicha fenomenología en el modelo de propagación propuesto.

A continuación se abordará una descripción de la velocidad del sonido, un parámetro clave en la propagación de las ondas acústicas. Posteriormente se detallarán los mecanismos que originan pérdidas de energía en la señal acústica, denominados pérdidas de transmisión, y se describirá el efecto del oleaje provocado por el viento en la superficie, así como el ruido presente en el medio. Finalmente, se describirá cómo se han implementado tanto el trazado de rayos como todos estos fenómenos en el modelo, y se recogerán las conclusiones extraídas de lo expuesto en este capítulo.

### **3.1. Velocidad del sonido en el agua**

Las ondas acústicas son ondas mecánicas, donde su propagación viene dada por la vibración de las partículas del medio. En el caso concreto de la propagación en entornos

subacuáticos estas ondas son longitudinales, es decir, la dirección de propagación es paralela a la vibración de las partículas del medio. Las ondas transversales se extinguen muy rápidamente, de manera que no se considera su propagación.

Para obtener una expresión matemática para la velocidad del sonido en el agua, se parte de un medio continuo y sin pérdidas, es decir, no se consideran efectos disipativos debidos a la viscosidad o la conducción del calor. Además se considera que la amplitud de la onda acústica es pequeña, de manera que los cambios en la densidad del medio serán pequeños en relación a su valor de equilibrio.

La ecuación de continuidad, dada por (3.1), relaciona la compresión o expansión del fluido con el movimiento de sus partículas [KFCS00],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

donde  $\rho$  es la densidad instantánea en un punto,  $t$  el tiempo y  $\vec{u}$  la velocidad de las partículas del medio en ese punto. Por otra parte, la condensación,  $s$ , relaciona la densidad instantánea con la densidad de equilibrio,  $\rho_0$ , según (3.2) [KFCS00]

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (3.2)$$

De esta manera, se puede expresar la densidad instantánea en un punto en función de la densidad de equilibrio y la condensación, según

$$\rho = \rho_0(1 + s) \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.3) en la ecuación de continuidad (3.1), asumiendo que la dependencia temporal de la densidad de equilibrio es despreciable y que el valor de la condensación es pequeño ( $s \ll 1$ ), se tiene

$$\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla (\rho_0 \vec{u}) = 0 \quad (3.4)$$

Derivando respecto al tiempo a ambos lados de la ecuación (3.4), recordando que la dependencia temporal de la densidad de equilibrio es despreciable, se llega a

$$\rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.5)$$

Por otro lado, la aceleración de un elemento infinitesimal del fluido viene dada por la ecuación lineal de Euler (3.6) [KFCS00], válida para procesos acústicos de pequeña amplitud.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (3.6)$$

Donde  $p$  es la presión acústica en ese punto. Calculando la divergencia a ambos lados de la ecuación (3.6), se tiene

$$\nabla \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = -\nabla^2 p \quad (3.7)$$

Sustituyendo la ecuación (3.7) en (3.5) y despejando, se llega a

$$\nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Para el caso de fluidos que no son gases ideales, existe una relación entre la presión acústica y la densidad, que se establece en función de un desarrollo de Taylor. En dicho desarrollo se asume que las fluctuaciones en la densidad son pequeñas, por lo que solo es necesario obtener términos hasta de primer orden, llegando a [KFCS00],

$$P_{ins} - P_0 \cong \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} (\rho - \rho_0) = \mathcal{B} \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (3.9)$$

donde  $P_{ins}$  es la presión instantánea en un punto,  $P_0$  es la presión de equilibrio en ese punto y  $\mathcal{B}$  es el módulo de compresibilidad adiabático. Teniendo en cuenta que la presión acústica en un punto,  $p$ , viene dada por  $P_{ins} - P_0$  y la definición de condensación dada en (3.2), la ecuación (3.9) se puede reescribir como

$$p \cong \mathcal{B} s \quad (3.10)$$

Despejando el valor de la condensación de (3.10) y sustituyendo en (3.8), se llega finalmente a la ecuación de ondas lineal

$$\nabla^2 p = \frac{\rho_0}{\mathcal{B}} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.11)$$

En la ecuación (3.11), el término  $\rho_0/\mathcal{B}$  tiene dimensiones de inversa de velocidad al cuadrado, por lo que se define la velocidad del sonido en el medio,  $c$ , como

$$c = \sqrt{\frac{\mathcal{B}}{\rho_0}} \quad (3.12)$$

Y la ecuación de ondas lineal se escribe finalmente como

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

Como no se ha considerado ninguna restricción espacial, esta ecuación es válida para todos aquellos medios en los que la velocidad del sonido es función de la posición, como ocurre en la atmósfera o en el agua. En el caso concreto del agua, elevando ambos términos de (3.12) al cuadrado y teniendo en cuenta que el módulo de compresibilidad adiabático se puede relacionar con el módulo de compresibilidad isotérmico,  $\mathcal{B}_T$ , en función del índice adiabático  $\gamma$ , la velocidad del sonido se puede expresar también como

$$c^2 = \gamma \frac{\mathcal{B}_T}{\rho_0} \quad (3.14)$$

Tanto el índice adiabático como el módulo de compresibilidad isotérmico y la densidad de equilibrio dependen a su vez de la temperatura y la presión, y si se considera agua salada,

también de la salinidad. Esta dependencia no es fácil de describir, por lo que la evaluación de la ecuación (3.14) es compleja en la práctica y se recurre a ecuaciones semiempíricas para obtener el valor de la velocidad del sonido. En el caso concreto de la velocidad del sonido, estas ecuaciones suelen mostrar su dependencia con la temperatura ( $T$ ), la presión del medio ( $P$ ) y salinidad ( $S$ ), por lo que son más sencillas de evaluar que la ecuación (3.14). Por el contrario, el rango de validez de la ecuación correspondiente vendrá limitado por los valores considerados en el conjunto de medidas a partir del cual se realizó el análisis.

De esta manera, en función del conjunto de medidas utilizado y las condiciones empleadas, existen en la actualidad diversas ecuaciones semiempíricas que permiten calcular la velocidad del sonido en función de estos tres parámetros [DWCH93]. Una de las primeras estimaciones más exactas la realizó Wilson en 1960, tanto para agua destilada como agua salada, empleando un velocímetro [Wil60]. Otros estudios posteriores parten de las medidas de Wilson, refinando sus resultados. Así, Frye y Pugh descubren en 1971 que el segundo set de medidas utilizado por Wilson es incompatible con el primero y aplican sus propias correcciones [FP71], al igual que Anderson [And71].

Las primeras medidas desde Wilson fueron realizadas por Del Grosso y Mader en 1972, considerando aguas neptunianas (del inglés *Neptunian waters*, que se refiere a masas de agua con valores de temperatura, presión y salinidad encontradas en los océanos), obteniendo su propia ecuación. Dos años más tarde, en 1974, Anderson combinó las medidas en agua salada de Del Grosso y Mader con medidas anteriores efectuadas por Del Grosso en agua dulce a una atmósfera de presión, llegando así a la ecuación del sonido de Del Grosso [Gro74]. Por otra parte, Chen y Millero calibraron un velocímetro en agua dulce en base a las medidas de Del Grosso para 1 atmósfera de presión, aplicando una corrección a altas presiones según los datos de Wilson. Una vez calibrado el velocímetro, calcularon la velocidad en agua salada en 1977 [CM77]. Por último, otra de las estimaciones más importantes la realizó Mackenzie en 1981, gracias a medidas obtenidas con un sumergible, navegando desde 6 a 1200 metros de profundidad [Mac81].

El rango de validez de estas ecuaciones se muestra en la tabla 3.1, donde también se recoge la desviación típica ( $\sigma$ ) del valor proporcionado por la ecuación respecto al conjunto de medidas utilizado. Hay que resaltar que las unidades de presión están dadas en  $\text{kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ , donde  $\text{kg}_f$  hace referencia a kilogramo-fuerza o kilopondio.

Se ha realizado una comparativa del valor de velocidad del sonido obtenido mediante estas ecuaciones, de manera que se pueda comprobar cómo de diferentes son los resultados proporcionados por ellas. Los valores computados con las distintas ecuaciones se han recogido en la figura 3.1, donde se ha variado uno de los tres parámetros manteniendo constante los otros dos, teniendo en cuenta que el parámetro que varía lo hace dentro del rango de validez de cada ecuación, tal y como está recogido en la tabla 3.1. Cabe resaltar que para las ecuaciones de Del Grosso y Chen y Millero, se han utilizado tanto los rangos de validez como los coeficientes proporcionados por la versión actualizada de ambas ecuaciones

Ecuación (Año)	T (°C)	P ( $\text{kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ )	S (‰)	$\sigma$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Wilson (1960) [Wil60]	-4 a 30	1 a 1000	0 a 37	0.30
Frye y Pugh (1971) [FP71]	-3 a 30	1.033 a 984.3	33.1 a 36.6	0.10
Anderson (1971) [And71]	-2.166 a 30.514	1 a 984	9.82 a 36.55	0.15
Del Grosso (1974) [Gro74]	0 a 30	0 a 1000	30 a 40	0.05
Chen y Millero (1977) [CM77]	0 a 40	0 a 1019.7	0 a 40	0.19
Mackenzie (1981) [Mac81]	0 a 30	0 a 837.5	30 a 40	0.07

**Tabla 3.1:** Rangos de validez de distintas ecuaciones para la velocidad del sonido en función de la temperatura ( $T$ ), presión ( $P$ ) y salinidad ( $S$ )

por Wong y Zhu, que las adaptaron a la escala internacional de temperatura de 1990 [Lab13].

En la figura 3.1 (a) se varía la temperatura, considerando una presión de  $10.2787 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$  (equivalente a 100 metros de profundidad) y una salinidad de 34 ‰, mientras que en la figura 3.1 (b) se muestran los valores obtenidos para esas condiciones entre 19 y 20°. Se puede apreciar como las ecuaciones de Del Grosso, Chen y Millero y Mackenzie proporcionan prácticamente el mismo resultado, con una diferencia máxima entre ellas que no llega a  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . La ecuación de Wilson es la que presenta un valor sistemáticamente más alto para la velocidad del sonido, presentando una diferencia de  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  respecto a las anteriores.

Por otra parte, en la figura 3.1 (c) se muestra la variación de la velocidad del sonido con la presión, considerando una temperatura de 15°C y una salinidad de 34 ‰, mientras que en la figura 3.1 (d) se muestran los valores obtenidos para esas condiciones entre 800 y 900  $\text{kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ . Las ecuaciones de Wilson, Frye y Pugh, Del Grosso y Chen y Millero presentan unos valores más parecidos entre sí, con una diferencia máxima de  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , que viene dada por las ecuaciones de Wilson, que proporciona los valores más altos, y Del Grosso, que da los valores más bajos para estas cuatro ecuaciones. Las ecuaciones de Anderson y Mackenzie proporcionan un valor inferior al calculado por las anteriores cuatro ecuaciones, siendo la diferencia de 1 o  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  respecto a la de Chen y Millero, respectivamente.

Por último, en la figura 3.1 (e) se representa la variación con la salinidad, para una temperatura de 15°C y una presión de  $10.2787 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}^{-2}$ , mientras que en la figura 3.1 (f) se muestran los valores obtenidos para esas condiciones entre 30 y 40 ‰. Nuevamente los resultados son muy parecidos entre sí, con una diferencia máxima en la velocidad del sonido de  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , que viene dada por la ecuación de Wilson, que obtiene los valores más altos, y las ecuaciones de Del Grosso, Chen y Millero y Mackenzie, que presentan los valores más bajos y son muy parecidos entre sí.

Tal y como se puede observar en la figura 3.1, todas las ecuaciones proporcionan

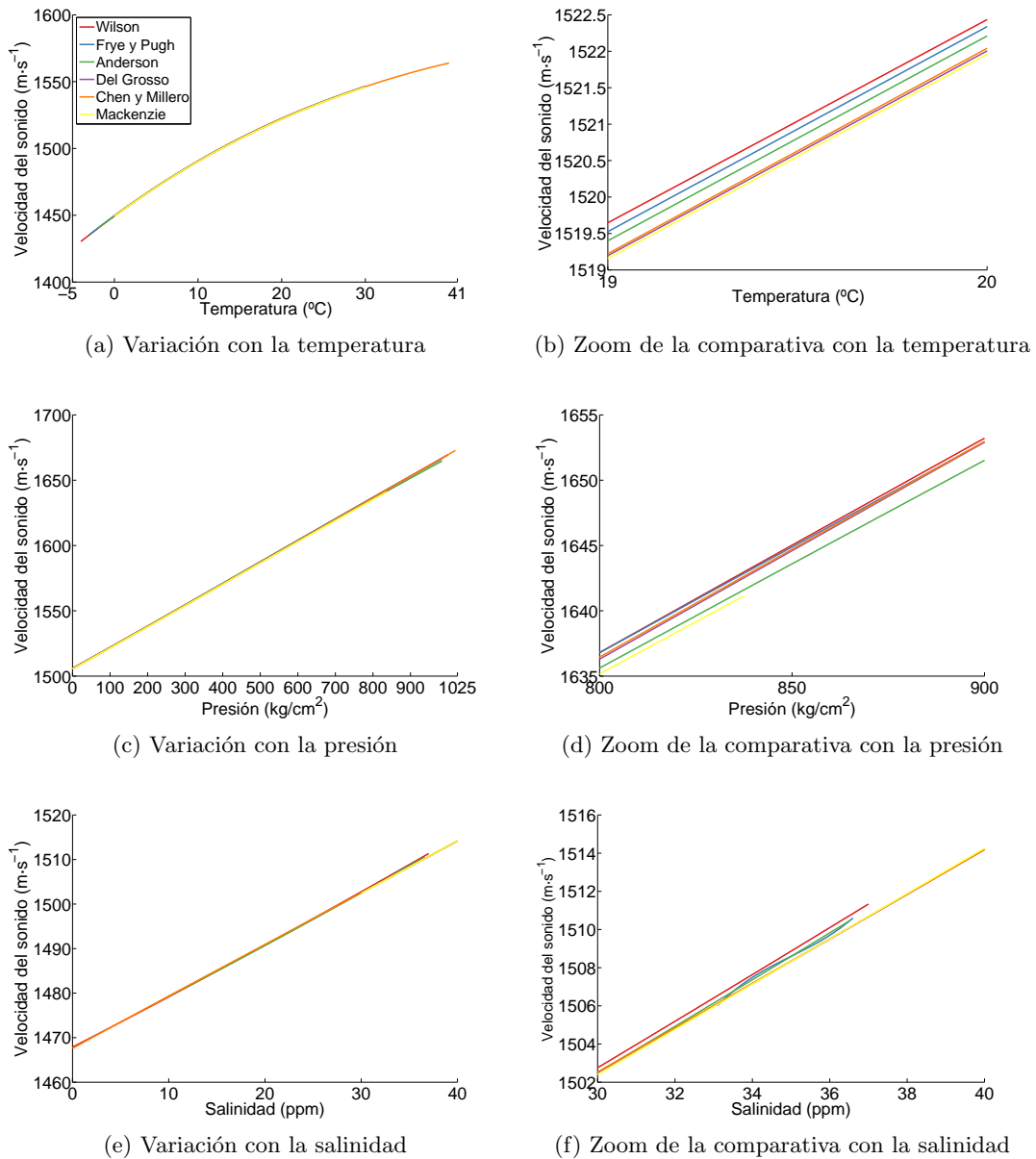


Figura 3.1: Comparativa de la velocidad del sonido calculada con las principales ecuaciones semiempíricas

resultados similares dentro de sus respectivos rangos de validez, con diferencias entre ellas que oscilan entre medio y un metro por segundo, en los casos extremos. Esta diferencia solo será apreciable en propagaciones a media o larga distancia, del orden de algunos kilómetros. A distancias cortas, del orden de centenares de metros, la diferencia de distancia recorrida por la onda acústica al utilizar las dos ecuaciones con resultados más dispares, será del orden de 10 cm.

No existe consenso en la comunidad científica sobre qué ecuación es la más indicada para calcular la velocidad del sonido, aunque según se puede comprobar en la tabla 3.1 la ecuación con menor desviación es la de Del Grosso, mientras que la de Chen y Millero es

más versátil en lo que respecta a sus datos de entrada. En la literatura se han presentado argumentos a favor [MW97] y en contra [Spi93] de la ecuación de Del Grosso, y la UNESCO ha tomado como estándar la ecuación de Chen y Millero [Lab13]. En lo que respecta al modelo desarrollado en esta tesis se ha optado por implementar la ecuación de Chen y Millero, debido a los siguientes factores:

- La falta de consenso existente en que la ecuación de Del Grosso sea mejor, y la consideración de estándar por parte de la UNESCO a la ecuación de Chen y Millero.
- Las diferencias en los resultados proporcionados por ambas ecuaciones se pueden considerar despreciables.
- Atendiendo a los rangos de validez de las distintas ecuaciones, la de Chen y Millero proporciona una mayor versatilidad al poder emplearse tanto en agua dulce como salada, algo que solo permite, además de ésta, la ecuación de Wilson, que como ya se ha comentado anteriormente presentaba algunas inexactitudes en los conjuntos de medidas empleados.

La ecuación de Chen y Millero viene dada según (3.15) [Lab13]

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2 \quad (3.15)$$

Donde las funciones  $C_w(T, P)$ ,  $A(T, P)$ ,  $B(T, P)$  y  $D(T, P)$  son

$$\begin{aligned} C_w(T, P) &= C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 \\ &+ (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P \\ &+ (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 \\ &+ (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \\ A(T, P) &= A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 \\ &+ (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P \\ &+ (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 \\ &+ (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \\ B(T, P) &= B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P \\ D(T, P) &= D_{00} + D_{10}P \end{aligned}$$

El valor de las constantes empíricas  $C_{ij}$ ,  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  y  $D_{ij}$  se recoge en la tabla 3.2.

Tal y como se muestra en la ecuación (3.15), la ecuación de Chen y Millero, y en general todas las ecuaciones semiempíricas presentadas, dependen de la temperatura, presión y salinidad, donde a su vez, estos parámetros varían con la profundidad. A la variación de la velocidad del sonido con la profundidad se la conoce como perfil de velocidad del sonido (*sound speed profile*). Al presentar las masas de agua unas propiedades muy diferentes



Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor
$C_{00}$	1402.388	$C_{01}$	5.03830	$C_{02}$	$-5.81090 \cdot 10^{-2}$
$C_{03}$	$3.3432 \cdot 10^{-4}$	$C_{04}$	$-1.47797 \cdot 10^{-6}$	$C_{05}$	$3.1419 \cdot 10^{-9}$
$C_{10}$	0.153563	$C_{11}$	$6.8999 \cdot 10^{-4}$	$C_{12}$	$-8.1829 \cdot 10^{-6}$
$C_{13}$	$1.3632 \cdot 10^{-7}$	$C_{14}$	$-6.1260 \cdot 10^{-10}$	$C_{20}$	$3.1260 \cdot 10^{-5}$
$C_{21}$	$-1.7111 \cdot 10^{-6}$	$C_{22}$	$2.5986 \cdot 10^{-8}$	$C_{23}$	$-2.5353 \cdot 10^{-10}$
$C_{24}$	$1.0415 \cdot 10^{-12}$	$C_{30}$	$-9.7729 \cdot 10^{-9}$	$C_{31}$	$3.8513 \cdot 10^{-10}$
$C_{32}$	$-2.3654 \cdot 10^{-12}$	$A_{00}$	1.389	$A_{01}$	$-1.262 \cdot 10^{-2}$
$A_{02}$	$7.166 \cdot 10^{-5}$	$A_{03}$	$2.008 \cdot 10^{-6}$	$A_{04}$	$-3.21 \cdot 10^{-8}$
$A_{10}$	$9.4742 \cdot 10^{-5}$	$A_{11}$	$-1.2583 \cdot 10^{-5}$	$A_{12}$	$-6.4928 \cdot 10^{-8}$
$A_{13}$	$1.0515 \cdot 10^{-8}$	$A_{14}$	$-2.0142 \cdot 10^{-10}$	$A_{20}$	$-3.9064 \cdot 10^{-7}$
$A_{21}$	$9.1061 \cdot 10^{-9}$	$A_{22}$	$-1.6009 \cdot 10^{-10}$	$A_{23}$	$7.994 \cdot 10^{-12}$
$A_{30}$	$1.100 \cdot 10^{-10}$	$A_{31}$	$6.651 \cdot 10^{-12}$	$A_{32}$	$-3.391 \cdot 10^{-13}$
$B_{00}$	$-1.922 \cdot 10^{-2}$	$B_{01}$	$-4.42 \cdot 10^{-5}$	$B_{10}$	$7.3637 \cdot 10^{-5}$
$B_{11}$	$1.7950 \cdot 10^{-7}$	$D_{00}$	$1.727 \cdot 10^{-3}$	$D_{10}$	$-7.9836 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3.2: Coeficientes empíricos de la ecuación de Chen y Millero [Lab13]

en función de la geografía, especialmente en lo que respecta a su temperatura, el perfil de la velocidad del sonido presenta una gran variabilidad geográfica. Adicionalmente, la temperatura de la masa de agua varía sustancialmente en función de la hora del día y la época del año, debido a la acción del sol durante el día y al cambio estacional del clima, presentando por tanto una gran variabilidad temporal, tanto a corto como largo plazo.

Tomando un perfil tipo para latitudes medias y periodo estival como el mostrado en la figura 3.2, se han resaltado diferentes zonas en función de las propiedades que presentan. Cerca de la superficie, hasta una profundidad de unos 50-100 m, la temperatura sufre cambios muy bruscos debido a la acción del calentamiento provocado por la acción del sol. Además, esta región está muy expuesta a la acción de la atmósfera, donde el oleaje generado por el viento provoca una mezcla de la masa de agua. Esta capa, denominada capa superficial (*surface layer*), es la que presenta mayores variaciones del perfil de velocidad del sonido en cortos espacios de tiempo. Debajo de esta capa se encuentra otra región que no está tan afectada por los ciclos de temperatura diarios y la acción de la atmósfera, pero sí lo está por los cambios de temperatura debido al cambio de estaciones, especialmente en verano y otoño. Esta capa se denomina termoclina estacional (*seasonal thermocline*), y se extiende hasta unos 200 m en la figura 3.2. Por debajo de esta capa la temperatura ya no se ve tan afectada por el cambio de estación, y comienza a descender a medida que aumenta la profundidad, hasta aproximadamente unos 1000 m. Esta región, donde se produce una disminución gradual de la velocidad del sonido debido a la disminución de

la temperatura, se denomina termoclina principal (*main thermocline*). A partir de este punto, la temperatura se mantiene prácticamente constante y no desciende más, aunque la profundidad siga aumentando. De esta manera, se produce un aumento continuo de la presión que no está compensado por la disminución de temperatura, por lo que la velocidad del sonido vuelve a aumentar. Esta región se conoce como capa isotérmica profunda (*deep isothermal layer*) [Lei98].

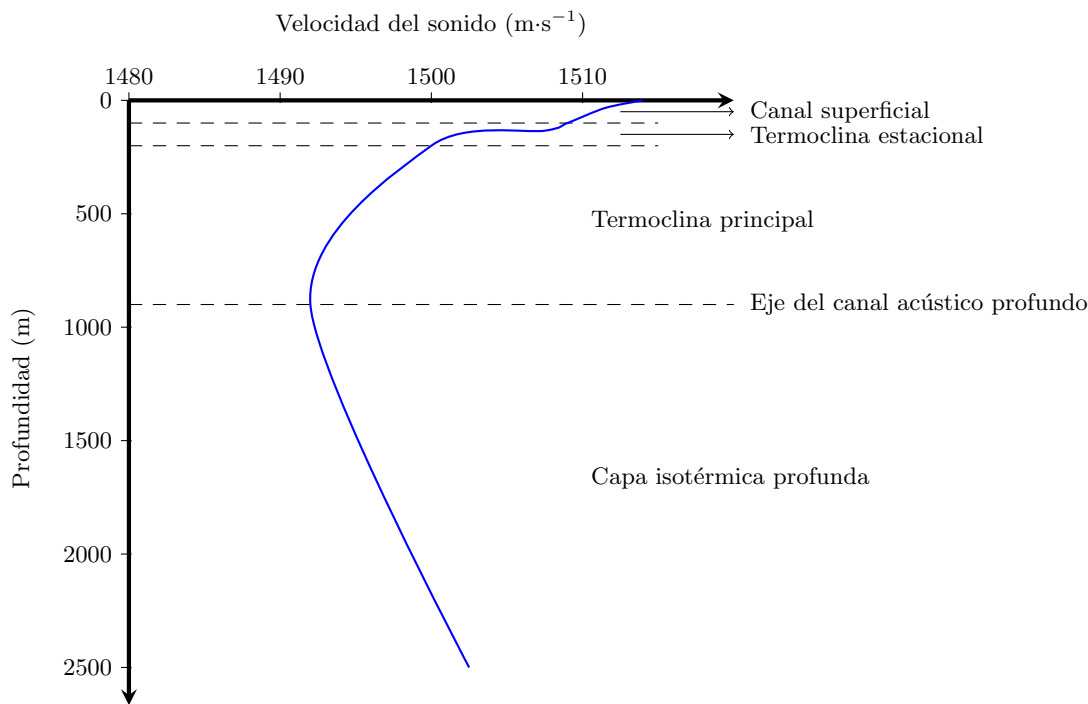


Figura 3.2: Perfil tipo de velocidad del sonido para latitudes medias y época estival

Hay que tener en cuenta que el caso descrito es un ejemplo concreto, que puede ser válido para latitudes medias y aguas profundas, pero no deja de ser una simplificación con valores orientativos para la profundidad de las distintas capas. En un caso real, estos valores pueden variar ostensiblemente en función de la posición geográfica, la época del año e incluso la hora del día, debido al efecto del sol sobre la capa superficial. Cabe destacar también el caso concreto de aguas muy poco profundas, en las que la profundidad es menor de 20 m. En este caso, la acción de la atmósfera provoca una gran mezcla de la masa de agua debido al oleaje, de manera que los valores de temperatura y salinidad son prácticamente constantes para toda la columna de agua, y la presión no resulta determinante debido a la poca profundidad existente. En este caso, se suele tomar como buena aproximación que la velocidad del sonido es constante en toda la columna de agua.

El perfil de velocidad del sonido afecta de manera crítica a la propagación de las ondas acústicas. Si existe un cambio en la velocidad del sonido con la profundidad, ocurrirá que regiones diferentes del frente de onda se propagarán a diferente velocidad, provocando un cambio en la dirección de dicho frente de ondas. Esta situación se ilustra en la figura 3.3.

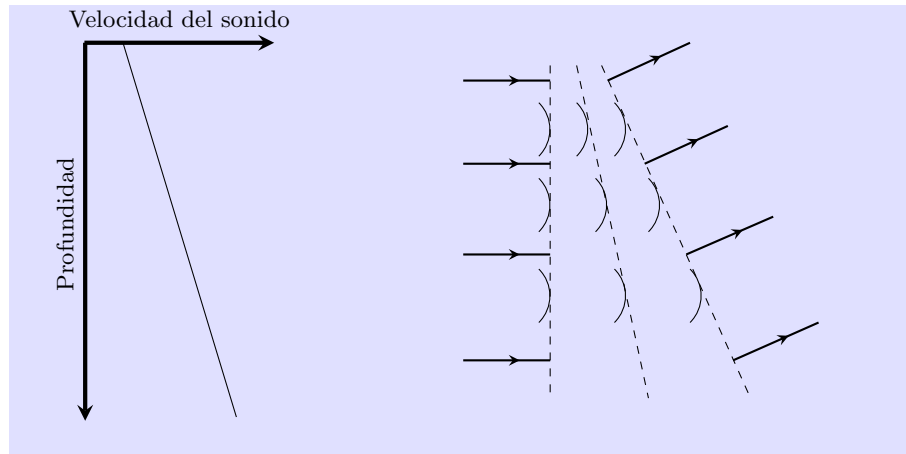


Figura 3.3: Cambio de dirección del frente de ondas

A la izquierda se muestra un perfil de velocidad del sonido sencillo, consistente en un gradiente positivo de la temperatura con la profundidad, y a la derecha, la propagación de la onda a tres profundidades diferentes y en tres instantes de tiempo diferentes, donde se ha exagerado la magnitud de este fenómeno respecto a la profundidad por claridad visual. Como la velocidad aumenta con la profundidad, la parte de la onda que se propaga a mayor profundidad lo hará más rápidamente, originando un cambio de dirección del frente de onda, que aparece en línea discontinua para los tres instantes de tiempo considerados. Teniendo en cuenta que un rayo es la representación de la recta perpendicular al frente de ondas, la acción del perfil de velocidad del sonido sobre los rayos es curvarlos hacia las regiones donde la velocidad del sonido es menor, tal y como se puede observar para el conjunto de cuatro rayos representado. Este efecto de curvatura de los rayos dará lugar a la aparición de canales de propagación en los entornos subacuáticos que presentan un interés especial en lo que respecta a la minimización de pérdidas de energía. Estos canales serán presentados a continuación.

### 3.1.1. Canales de propagación debidos al perfil de velocidad del sonido

Debido a la acción del perfil de velocidad del sonido, y dependiendo también de la ubicación del emisor, existen en el medio subacuático algunos tipos de propagaciones que presentan especial interés, fundamentalmente porque consiguen un ahorro de pérdidas de transmisión, permitiendo propagaciones a muy larga distancia si se usan fuentes de baja frecuencia (del orden de hercios o centenares de hercios). A continuación se revisan los dos canales más importantes.

### A. Canal superficial

El canal superficial (*surface duct*) se forma cuando existe un gradiente positivo del perfil de velocidad del sonido partiendo de la superficie hacia profundidades mayores. Si se ubica el emisor dentro del canal, parte de la señal acústica se curvará de nuevo hacia la superficie, evitando así cualquier tipo de interacción con el fondo marino. Si la frecuencia empleada es baja, del orden de cientos de hercios, esto asegura propagaciones a larga distancia debido a que la señal pierde poca energía en su interacción con la superficie, además de no perder energía en el fondo al no interactuar con él. Para frecuencias elevadas, la onda acústica comienza a tener pérdidas apreciables de energía en cada rebote, tal y como se verá en la sección 3.2.3, por lo que este tipo de propagación pierde gran parte de su interés.

Un ejemplo de este tipo de canal se representa en la figura 3.4. Estos resultados se han obtenido con el modelo de propagación desarrollado en esta tesis. En (a) se muestra un perfil de velocidad del sonido para esta situación, donde existe un gradiente positivo de la velocidad del sonido hasta una profundidad cercana a los 30 m, manteniéndose constante a partir de ese punto hasta que alcanza la profundidad de 200 m. Esta puede ser una situación simplificada para una época invernal, donde la masa de agua cercana a la superficie sufre los efectos de las bajas temperaturas, y este efecto no se ha propagado al resto de la columna de agua. Se sitúa un emisor a 4 m de profundidad y un receptor a 5 m de profundidad (aparecen como un triángulo rojo en la figura), y se lanzan 40 rayos entre  $\pm 15^\circ$ , obteniendo el trazado mostrado en 3.4 (b). Tal y como se puede apreciar en el trazado, existe una cantidad importante de rayos que llegan al receptor sin interactuar con el fondo marino. Si se emplea una frecuencia baja y se ubica el receptor dentro del canal, se obtendrían numerosas llegadas con unas pérdidas de transmisión menores que si la señal se propagase por todo el entorno, sufriendo más interacciones con el fondo.

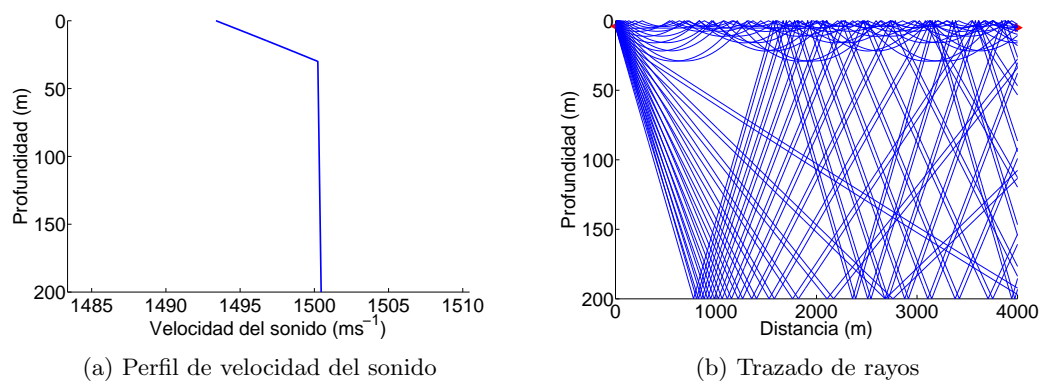


Figura 3.4: Propagación en un canal superficial

No obstante, existe un límite para las frecuencias a emplear dentro del canal. Si la frecuencia es demasiado baja, la longitud de onda puede llegar a ser mayor que la anchura del canal, resultando en que parte de la energía se sale fuera del canal superficial. Existirá por tanto una determinada longitud de onda de referencia, donde para valores

mayores ocurrirá este fenómeno. El valor de esta longitud de onda viene dada por [Uri83]

$$\lambda_{max} = \frac{8}{3}\sqrt{2} \int_0^H \sqrt{n(z) - n(H)} dz \quad (3.16)$$

donde  $H$  es la anchura del canal donde se propaga la onda,  $n(z)$  es el índice de refracción a una profundidad  $z$  del canal, y  $n(H)$  es el índice de refracción en la base del canal. Para un canal superficial con una anchura de 30 m como el mostrado en la figura 3.4, y considerando unos valores cercanos a los  $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para la velocidad del sonido, esta longitud de onda de corte tiene un valor aproximado de 1 m, que se correspondería con una frecuencia del orden de 1.5 kHz.

## B. Canal acústico profundo

El canal acústico profundo (*Deep Sound Channel*) se forma cuando en el perfil de velocidad del sonido existe un mínimo a una determinada profundidad. A la profundidad del mínimo de la velocidad del sonido se la conoce como eje del canal acústico profundo, y a su alrededor la velocidad del sonido es mayor. De este modo y tal y como se ha visto anteriormente, la acción del perfil es curvar los rayos hacia el mínimo, por lo que para determinados ángulos de propagación y si se ubica al emisor dentro del canal acústico profundo, habrá una determinada cantidad de rayos que no sufrirá ningún rebote ni con la superficie ni con el fondo. Las propagaciones a larga distancia que permite este canal han sido aprovechadas para localizar impactos de misiles, la determinación de distancias geodésicas o la localización de aviones abatidos en el océano [Uri83].

Un ejemplo de este tipo de propagación se muestra en la figura 3.5, donde estos resultados se han obtenido con el modelo de propagación desarrollado en esta tesis. En (a) se muestra un perfil de velocidad del sonido típico de esta situación, obtenido mediante los valores proporcionados por el *World Ocean Database* de 2009 [Cen09], para una latitud cercana a Comodoro Rivadavia (Argentina), en época estival, varios cientos de kilómetros mar adentro. El eje del canal acústico se encuentra a 1000 m de profundidad aproximadamente. En (b) se muestra el trazado de rayos obtenido con el modelo, lanzando 40 rayos entre  $\pm 5^\circ$ , con el emisor ubicado en el eje del canal. Se observa como los rayos lanzados cerca del eje se propagan hasta una distancia de 80 km sin sufrir ningún rebote a diferencia de los otros caminos, lo que permitirá detectar la señal más fácilmente al haber sufrido menos pérdidas de energía en su propagación.

## 3.2. Pérdidas de transmisión

A medida que la onda acústica se propaga por el medio va perdiendo energía debido a diferentes procesos. Esta energía perdida se engloba en un término denominado pérdidas de transmisión (*transmission loss*, TL), que relaciona la intensidad acústica en un punto

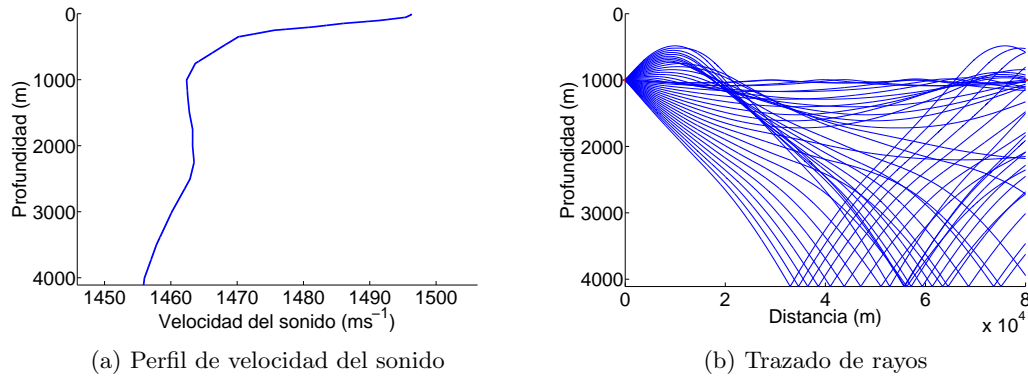


Figura 3.5: Propagación en un canal acústico profundo

lejano,  $I_1$ , con la intensidad a un metro del centro acústico de la fuente,  $I_0$ , según (3.17) [Uri83]

$$TL = 10 \log \frac{I_0}{I_1} \quad (dB) \quad (3.17)$$

donde originalmente, en esta ecuación la intensidad  $I_0$  se toma como referencia a una distancia de 1 yarda ( $1 \text{ yd} \approx 0.9144 \text{ m}$ ), pero a efectos prácticos esta diferencia se considera despreciable. Por otra parte, la intensidad acústica es el promedio temporal de la intensidad acústica instantánea, que viene dada por (3.18)

$$I(t) = \frac{\text{Energía}}{\text{Superficie} \cdot \text{Tiempo}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Velocidad}}{\text{Superficie}} = \text{Presión} \cdot \text{Velocidad} \quad (3.18)$$

Por lo que la intensidad acústica se puede expresar según (3.19)

$$I = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} p u dt \quad (3.19)$$

donde  $p$  es la presión acústica,  $u$  la velocidad de las partículas en el medio y  $T_w$  el periodo de la onda acústica, asumiendo que se tiene una única frecuencia. Para una onda plana armónica que se propaga en la dirección positiva del eje de distancias, se puede expresar la presión acústica según (3.20) [KFCS00]

$$p = \rho c u \quad (3.20)$$

donde  $\rho$  es la densidad del medio y  $c$  la velocidad del sonido. Despejando de (3.20) el valor de  $u$  y sustituyéndolo en (3.19), se llega a

$$I = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} \frac{p^2}{\rho c} dt = \frac{1}{\rho c T_w} \int_0^{T_w} p^2 dt \quad (3.21)$$

La evaluación de las pérdidas de transmisión a partir de (3.17) considerando la ecuación de intensidad dada en (3.21) resulta por tanto complicada cuando existen señales afectadas

por multicamino y de cierto ancho de banda. Por lo tanto, es común expresar esta magnitud en virtud de la contribución de distintos fenómenos que afectan a la intensidad acústica. Los principales procesos que originan pérdidas en la transmisión acústica entre dos puntos son: divergencia geométrica, absorción y pérdidas por rebote tanto en la superficie como en el fondo. De esta manera, las pérdidas de transmisión se pueden expresar también según

$$TL = TL_{geo} + TL_{abs} + TL_{sup} + TL_{fon} \quad (3.22)$$

donde  $TL_{geo}$  recoge las pérdidas de energía por divergencia geométrica,  $TL_{abs}$  las pérdidas por absorción,  $TL_{sup}$  las pérdidas debidas a rebotes en la superficie y  $TL_{fon}$  las pérdidas por rebotes en el fondo. A continuación se revisará con más detalle cada uno de estos mecanismos.

### 3.2.1. Divergencia geométrica

Cuando una fuente puntual emite una onda acústica en un medio homogéneo, infinito y sin pérdidas, la energía de la onda se reparte en la superficie de una esfera. A medida que la onda acústica se propaga por el medio, el radio de esta esfera va aumentando y por tanto, puesto que no hay pérdidas en el medio, la energía emitida tiene que repartirse en una superficie mayor. Este fenómeno se conoce como divergencia esférica, y se representa en la figura 3.6, donde la onda, emitida por una fuente puntual, se ha propagado desde una distancia  $r_0$  a una distancia  $r_1$ .

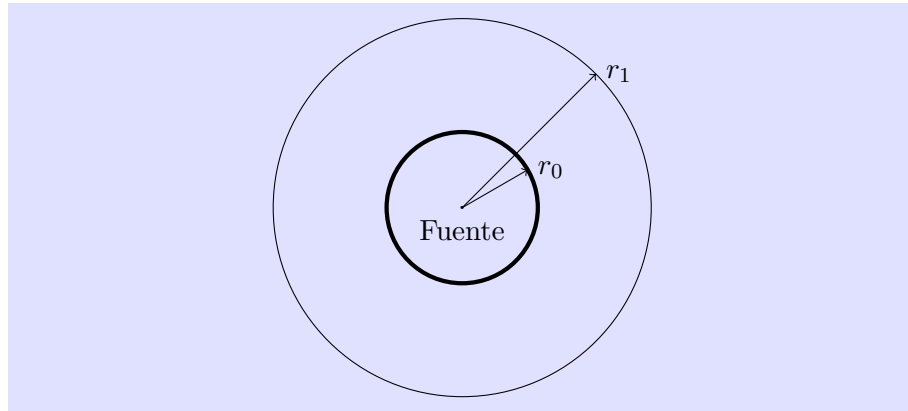


Figura 3.6: Representación de la divergencia esférica

Al considerarse un medio sin pérdidas, la potencia  $Pot$  es la misma para la superficie de las dos esferas, de radios  $r_0$  y  $r_1$ . Como la potencia es la intensidad acústica por superficie, resulta

$$Pot = 4\pi r_0^2 I_0 = 4\pi r_1^2 I_1 \quad (3.23)$$

Despejando el valor de  $I_0$  de la ecuación (3.23) y sustituyéndolo en (3.17), y considerando además que  $r_0$  es igual a 1 metro, se tiene que las pérdidas de transmisión por divergencia

geométrica, en el caso de ser esférica, vienen dadas por

$$TL_{geo} = 10 \log r_1^2 = 20 \log r_1 \quad (dB) \quad (3.24)$$

Sin embargo, el medio subacuático se encuentra restringido por dos superficies de separación que imponen una limitación física a la propagación, como son la superficie del mar y el fondo marino. Cuando esta interacción tiene lugar en un entorno de profundidad  $H_f$ , tal y como representa la figura 3.7, a partir de una determinada distancia se puede considerar que la potencia emitida por la fuente se distribuye sobre la superficie de un cilindro, en este caso, de radios  $r_0$  y  $r_1$ .

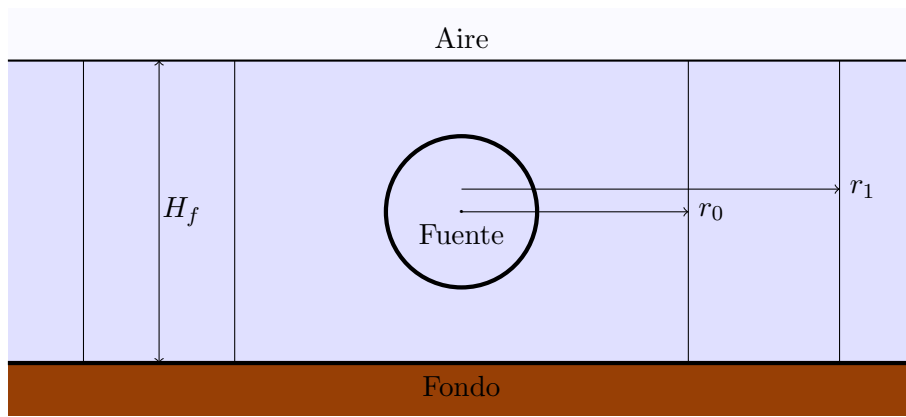


Figura 3.7: Representación de la divergencia cilíndrica

De la misma manera que con la divergencia esférica, si se considera que  $r_0$  es 1 metro, y como no hay pérdidas en el medio, la potencia emitida se mantiene constante, y por tanto se obtiene que

$$P = 2\pi r_0 H_f I_0 = 2\pi r_1 H_f I_1 \quad (3.25)$$

Despejando  $I_0$  de (3.25) y sustituyendo en (3.17), se obtiene que las pérdidas de transmisión por divergencia cilíndrica vienen dadas por (3.26):

$$TL_{geo} = 10 \log r_1 \quad (dB) \quad (3.26)$$

De manera general, las pérdidas de transmisión debido a la divergencia geométrica se pueden escribir como (3.27)

$$TL_{geo} = k_{geo} \log r_1 \quad (dB) \quad (3.27)$$

donde  $k_{geo}$  es una constante que valdrá 10 si se considera una divergencia cilíndrica, o 20 si se considera divergencia esférica. Por lo general y salvo propagaciones a larga distancia en entornos de aguas muy poco profundas, es decir, cuando la distancia es mucho mayor que la profundidad, la divergencia geométrica se suele considerar esférica, siendo esta suposición apoyada por los valores obtenidos en las distintas pruebas realizadas a lo largo de las décadas [Uri83].



La ecuación (3.27) es la que se ha incorporado en el modelo para calcular las pérdidas de transmisión por divergencia geométrica, donde el valor del parámetro  $k_{geo}$  se puede ajustar en función del entorno que se quiera simular. No obstante, la ecuación (3.27) hace referencia a la distancia  $r_1$ , siendo ésta la distancia entre emisor y receptor en línea recta, situación que no será la habitual. Por lo tanto, en el modelo se calculan las pérdidas de transmisión por divergencia geométrica para cada rayo siguiendo (3.27), pero teniendo en cuenta la distancia recorrida por cada uno de estos rayos en el entorno, según el camino que recorren desde el emisor al receptor.

### 3.2.2. Absorción

Hasta ahora se ha considerado que el medio subacuático no presenta pérdidas, y únicamente se produce una redistribución de la energía a medida que la onda acústica se propaga por el medio, dando lugar a la divergencia geométrica. Sin embargo, en la realidad existe una transferencia de energía de la onda al medio al propagarse, debido principalmente a la viscosidad de éste, originando el fenómeno conocido como absorción.

De forma general, cuando una onda plana se propaga una distancia  $dx$  en un medio que provoca pérdidas, y ha sido emitida con una intensidad  $I$  en el punto de partida, sufre una pérdida  $dI$  que viene dada por (3.28) [Uri83]

$$\frac{dI}{I} = -adx \quad (3.28)$$

donde  $a$  es una constante de proporcionalidad. Integrando entre una distancia inicial  $r_0$  y una distancia  $r_1$ , se tiene

$$I_1 = I_0 e^{-a(r_1 - r_0)} \quad (3.29)$$

siendo  $I_0$  la intensidad acústica en  $r_0$ , e  $I_1$  la intensidad acústica en  $r_1$ . Aplicando el logaritmo decimal a ambos lados y multiplicado por 10, se obtiene

$$10 \log I_1 - 10 \log I_0 = -10a(r_1 - r_0) \log e \quad (3.30)$$

Definiendo  $\alpha = 10a \log e$  y despejando de (3.30), se llega a

$$\alpha = \frac{10 \log I_0 - 10 \log I_1}{r_1 - r_0} \quad (3.31)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción, expresado en decibelios por kiloyarda ( $\text{dB} \cdot \text{kyd}^{-1}$ ), aunque nuevamente, se usan indistintamente los decibelios por kilómetro  $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . Al aparecer de nuevo la intensidad acústica, la evaluación de esta expresión es complicada. Por lo tanto y de manera análoga a la velocidad del sonido, existen numerosas mediciones a lo largo de la historia para determinar el valor de este coeficiente de absorción de manera semiempírica.

Las primeras medidas las realizó Stephenson a principios de la década de los años 30 del siglo pasado, emitiendo pulsos sinusoidales en un barco y recojiéndolos en un submarino. En los años siguientes hubo un gran interés debido al desarrollo del sónar durante la Segunda Guerra Mundial, posteriormente entre 1950 y 1960 gracias a los estudios en el laboratorio de Wilson y Leonard [OWL54], y posteriormente con los trabajos de Hansen y Glotov [Uri83].

En 1945 Rayleigh identificó la viscosidad del medio como uno de los mecanismos principales de absorción en el agua potable. Esta viscosidad, también conocida como viscosidad dinámica o de cizalladura (*dynamic* o *shear viscosity*), es la resistencia que ofrece el fluido cuando dos capas de éste, paralelas entre sí, se mueven a distinta velocidad. La absorción debido a la viscosidad dinámica viene dada por [Uri83]

$$\alpha = \frac{16\pi^2\mu_s}{3\rho c^3} f^2 \quad (3.32)$$

donde  $\mu_s$  es la viscosidad dinámica en equilibrio,  $\rho_w$  la densidad en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $c$  la velocidad del sonido en  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $f$  la frecuencia en Hz. Sin embargo, utilizando esta ecuación la contribución de la viscosidad dinámica no era suficiente para explicar los resultados. Esta diferencia de energía se atribuyó posteriormente a otro tipo de viscosidad, denominada viscosidad volumétrica o viscosidad de compresión (*volume* o *bulk viscosity*). Este término consiste en la absorción de energía como resultado de la resistencia en fluidos compresibles a procesos de compresión o expansión. Considerando pues ambas contribuciones, la absorción debida a la viscosidad se puede expresar como [Uri83]

$$\alpha = \frac{16\pi^2}{3\rho c^3} \left( \mu_s + \frac{3}{4}\mu_v \right) f^2 \quad (3.33)$$

Siendo  $\mu_v$  la viscosidad volumétrica. En agua salada hay que tener en cuenta además la contribución de diversas sales disueltas. Así, Leonard, Combs y Skidmore identificaron al sulfato de magnesio como el causante principal de pérdidas por absorción en agua salada [LCLS49]. Esta pérdida de energía se debe a un mecanismo conocido como relajación iónica (*ionic relaxation*), donde los iones de sulfato de magnesio se disocian y asocian de nuevo debido al efecto de la presión de la onda acústica. Este proceso tiene lugar durante un tiempo denominado tiempo de relajación [Uri83].

Posteriormente, en 1965 Thorp encontró que para frecuencias inferiores a 1 kHz aparecen otros mecanismos de absorción distintos al sulfato de magnesio, obteniendo pérdidas 10 veces mayores que las predichas contemplando únicamente al sulfato de magnesio. Finalmente, se identificaron los procesos de relajación del ácido bórico como el responsable de estas pérdidas por absorción, así como la dispersión debida a inhomogeneidades en el medio, que contribuyen con una cantidad independiente de la frecuencia de aproximadamente  $0.003 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ . Adicionalmente, Fisher en 1958 y Bezdek en 1973 demostraron la existencia de una dependencia de la absorción con la profundidad, lo que implica una dependencia con la presión ejercida por el medio [Uri83].

Todas estas dependencias reflejan la gran complejidad que representa modelar el coeficiente de absorción, puesto que la concentración de sulfato de magnesio y ácido bórico afectan a la estimación de este parámetro, y estas concentraciones varían además con la ubicación geográfica. Gracias a todas las medidas y a la investigación realizada durante el siglo pasado, actualmente existen diversas expresiones semiempíricas para evaluar el coeficiente de absorción, siendo las más importantes las de Thorp [Tho67], Fisher y Simmons [FS77], y la de François y Garrison [FG82a, FG82b]. La tabla 3.3 recopila los rangos de validez de estas ecuaciones, donde  $f$  es la frecuencia máxima de la señal para la que es válida la ecuación, la temperatura  $T$  se expresa en grados Celsius, la presión  $P$  en atmósferas, la salinidad  $S$  en partes por mil y el pH del agua es adimensional. El guión – indica que se puede usar todo el rango de valores posible para esa variable, mientras que si la ecuación no incluye a esa variable, se ha dejado en blanco.

Ecuación (Año)	$f$ (kHz)	$T$ (°C)	$P$ (atm)	$S$ (‰)	pH
Thorp (1967) [Tho67]	hasta 50				
Fisher y Simmons (1977) [FS77]	hasta 467	-	-	35	8.0
François y Garrison (1982) [FG82a, FG82b]	0.2 a 1000	-	-	-	-

**Tabla 3.3:** Rangos de validez de las distintas ecuaciones para el coeficiente de absorción

Al igual que en la sección 3.1, se han comparado los resultados proporcionados por las distintas ecuaciones para la absorción. Para ello se ha considerado una temperatura de 15°C, una presión de 1 atm (equivalente a 10 m de profundidad), una velocidad del sonido de 1500 m·s<sup>-1</sup>, pH de 8 y salinidad de 35 ‰. La frecuencia varía desde un mínimo de 50 Hz hasta el máximo de cada ecuación, excepto para la de François y Garrison, que comienza en 200 Hz. Los resultados se muestran en la figura 3.8, donde en (a) se muestra toda la variación en el rango de frecuencias considerado, y en (b) los resultados entre 1 y 100 kHz, donde se hace notar que se ha cambiado la escala vertical por claridad visual. Estos resultados muestran que para frecuencias del orden del kHz, la diferencia entre los resultados obtenidos por las distintas ecuaciones para el coeficiente de absorción es prácticamente despreciable, estando en torno a 0.01 dB·km<sup>-1</sup> para los valores más dispares del coeficiente de absorción. En cambio, para una frecuencia del orden de 20 kHz esta diferencia aumenta ya hasta los 2 dB·km<sup>-1</sup>. De esta manera, se apreciarán diferencias notables en el coeficiente de absorción según sea calculado por una u otra ecuación para frecuencias de decenas de kilohercios y propagaciones a media distancia, de al menos uno o dos kilómetros.

Según los rangos de validez recogidos en la tabla 3.3, se ha optado en este trabajo por utilizar la ecuación de François y Garrison para calcular el coeficiente de absorción, al ser la ecuación más completa de todas las consideradas. El coeficiente de absorción dado por

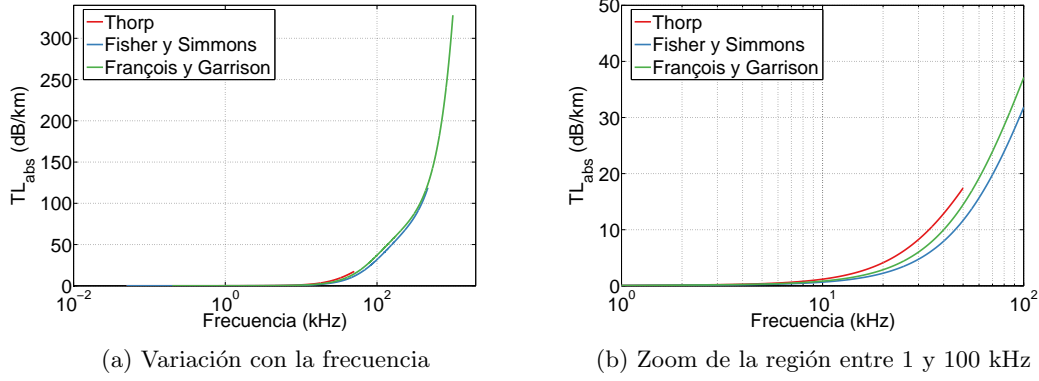


Figura 3.8: Comparativa del coeficiente de absorción obtenido por las principales ecuaciones semiempíricas

François y Garrison, se calcula según (3.34) [FG82b]

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (dB \cdot km^{-1}) \quad (3.34)$$

Siendo  $f$  la frecuencia de la señal acústica en kilohercios, y  $A_i$ ,  $P_i$  y  $f_i$  coeficientes empíricos. El primer término recoge la contribución del ácido bórico, el segundo la contribución del sulfato de magnesio, y el tercero la del agua destilada. El valor de los parámetros  $A_i$ ,  $P_i$ ,  $f_i$  se muestra a continuación [FG82b]

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{8.86}{c} 10^{0.78pH-5} \quad (dB \cdot km^{-1} \cdot kHz^{-1}) \\ P_1 &= 1 \\ f_1 &= 2.8(S/35)^{0.5} 10^{4-1245/\theta_T} \quad (kHz) \\ A_2 &= 21.44(S/c)(1 + 0.025T) \quad (dB \cdot km^{-1} \cdot kHz^{-1}) \\ P_2 &= 1 - 1.37 \cdot 10^{-4}z + 6.2 \cdot 10^{-9}z^2 \\ f_2 &= \frac{8.17 \cdot 10^{8-1990/\theta_T}}{1 + 0.0018(S - 35)} \quad (kHz) \\ A_3^{T \leq 20} &= 4.937 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5}T + 9.11 \cdot 10^{-7}T^2 - 1.50 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (dB \cdot km^{-1} \cdot kHz^{-2}) \\ A_3^{T > 20} &= 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5}T + 1.45 \cdot 10^{-7}T^2 - 6.5 \cdot 10^{-10}T^3 \quad (dB \cdot km^{-1} \cdot kHz^{-2}) \\ P_3 &= 1 - 3.83 \cdot 10^{-5}z + 4.9 \cdot 10^{-10}z^2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en  $m \cdot s^{-1}$ ,  $\theta_T = 273 + T$ ,  $z$  es la profundidad en m,  $S$  la salinidad en tanto por mil y  $pH$  el valor de pH del agua.

### 3.2.3. Pérdidas por rebotes

La última fuente principal de pérdidas de transmisión tiene que ver con la interacción de la onda acústica con la superficie del mar y el fondo marino<sup>1</sup>. Dependiendo de la distancia que separa al emisor del receptor, la ubicación y el patrón angular de los transductores y la forma del perfil de velocidad del sonido, la onda acústica interaccionará en mayor o menor medida con dichas superficies al propagarse por el medio. En este proceso de interacción, la onda acústica perderá energía debido a la transmisión al medio donde se refleja. A continuación se describirán ambas interacciones con más detalle.

#### A. Reflexión en la superficie del mar

Debido a la diferencia de impedancia acústica entre el agua y el aire la superficie del mar se suele considerar un reflector casi perfecto de ondas acústicas, por lo que el modelo más sencillo consiste en suponer que no se pierde energía. Sin embargo, esto es correcto siempre y cuando la superficie del mar esté en calma, situación en la que se puede considerar plana. A medida que se vuelve más irregular, como ocurre debido al oleaje generado por el viento, no se puede considerar que la reflexión sea perfecta y las ondas acústicas pierden energía debido a la dispersión (*scattering*) de ésta en todas direcciones, originando así un proceso de reverberación.

La irregularidad geométrica de la superficie del mar en lo que respecta a la reflexión se suele cuantificar mediante el parámetro de Rayleigh (3.36), que viene dado por la ecuación (3.36) [Uri83]

$$R = kH_w \sin \theta_s \quad (3.36)$$

donde  $k$  es el número de onda,  $H_w$  es el valor rms de la altura de la ola (medida desde la base hasta la cresta), y  $\theta_s$  es el ángulo de incidencia rasante. Este parámetro refleja que la irregularidad dependerá directamente de la frecuencia de la señal acústica y de la altura de las olas presentes en la superficie, así como del ángulo con el que incida la señal. Cuando  $R \ll 1$ , se considera que la superficie es un reflector perfecto y no hay pérdidas de energía. Por el contrario, si  $R \gg 1$  la irregularidad de la superficie del mar es importante y se debe considerar que la señal reflejada ha sufrido unas determinadas pérdidas de transmisión en el rebote, provocadas por la dispersión de energía en todas direcciones generada por esta superficie irregular.

La figura 3.9 muestra la dependencia de este coeficiente  $R$  con la frecuencia, para dos valores distintos de altura de olas y de ángulos de incidencia rasante. Tal y como se puede apreciar en la figura, para frecuencias del orden de 20 kHz el coeficiente de Rayleigh toma un valor mayor que 1 para el caso más favorable, correspondiente a una altura de olas de 10 cm y un ángulo de incidencia rasante de 10°, siendo incluso mayor para los otros casos

<sup>1</sup>Se hablará por defecto de superficie del mar y fondo marino, pero el modelo es también válido para agua dulce, como puede ser un río o un embalse.

considerados. Este hecho muestra la necesidad de considerar pérdidas de transmisión si la frecuencia emitida está por encima de 10 kHz, mientras que por debajo de esta frecuencia y salvo para situaciones importantes de oleaje, se podría asumir una reflexión especular.

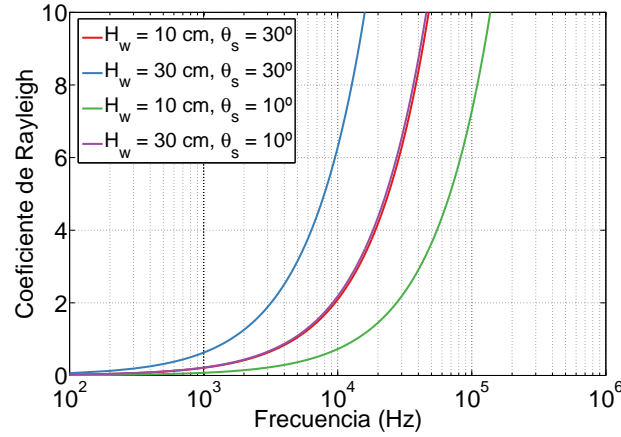


Figura 3.9: Variación del coeficiente de Rayleigh con la frecuencia de la señal incidente para distintas alturas de olas ( $H_w$ ) y ángulos de incidencia rasante ( $\theta_s$ )

La influencia de la superficie del mar como mecanismo que provoca pérdidas de transmisión en la señal acústica ha sido investigado desde mediados del siglo pasado. Así, entre 1947 y 1948 Urick, Saxton y Liebermann encontraron experimentalmente un valor medio de 3 dB de pérdidas por cada rebote, considerando señales con frecuencias comprendidas entre 25 y 30 kHz, para olas comprendidas entre 6 y 30 cm y ángulos de incidencia rasante entre  $3^\circ$  y  $18^\circ$  [Uri83].

De manera teórica, si una onda incide con una intensidad acústica  $I_i$  y se refleja con una intensidad  $I_r$ , las pérdidas por reflexión en la superficie vendrían dadas por

$$TL_{sup} = 10 \log(I_r/I_i) \quad (dB) \quad (3.37)$$

Esta ecuación permite calcular las pérdidas de transmisión con las limitaciones ya comentadas en lo que respecta a la intensidad acústica. Con el objetivo de modelar de una manera sencilla estas pérdidas, pero con la intención de obtener un modelo de propagación lo más realista posible, se ha implementando la ecuación de pérdidas de transmisión para la superficie de Beckmann y Spizzichino, en la forma descrita por Coates [Coa88]. Existen otros modelos como el de Kirchhoff o el de Williams, pero según los resultados obtenidos en [JDM<sup>+</sup>10], el modelo de Beckmann y Spizzichino es el que parece obtener resultados más cercanos a los reales, además de ser uno de los modelos para pérdidas en superficie más usados, desde la década de los 60 del siglo pasado.

La ecuación de Beckmann y Spizzichino calcula las pérdidas de transmisión por rebote en la superficie,  $TL_{sup}$  (3.38), en función de la frecuencia de la señal  $f$  en kHz, la velocidad del viento en la superficie  $v_w$  en nudos (kn), y el ángulo de incidencia respecto a la superficie

$\theta$ , en grados.

$$TL_{sup} = 10 \log \left( \frac{1 + (f/f_1)^2}{1 + (f/f_2)^2} \right) - \left( 1 + \frac{90 - v_w}{60} \right) \left( \frac{\theta}{30} \right)^2 \quad (dB/rebote) \quad (3.38)$$

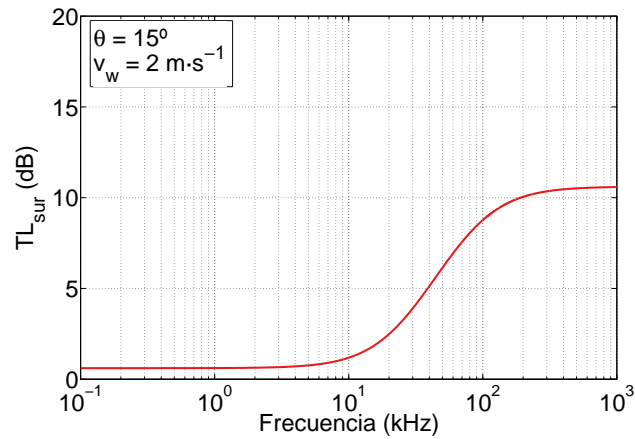
donde  $f_1 = \sqrt{10}f_2$  y  $f_2 = 378v_w^{-2}$ . Esta ecuación supone por tanto una manera sencilla de calcular las pérdidas de transmisión, al depender de parámetros cuyo valor se obtiene fácilmente en el modelo, a la vez que resulta una interpretación más realista que una reflexión perfecta. Adicionalmente, Coates estudió el comportamiento de esta ecuación en un rango de frecuencias comprendido entre 10 Hz y 1 MHz, lo que asegura un amplio rango de validez.

La figura 3.10 (a) muestra la variación de  $TL_{sup}$  con respecto a la frecuencia para un ángulo de incidencia de  $15^\circ$ , considerando una velocidad del viento de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , donde se ha tenido en cuenta que  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 1.9438 \text{ kn}$ . Por debajo de 10 kHz las pérdidas por rebote rondan el decibelio, aumentando hasta los 10 dB, obtenidos para una frecuencia de 200 kHz. La figura 3.10 (b) muestra la variación respecto a la velocidad del viento para un ángulo de incidencia de  $15^\circ$  y una frecuencia de 30 kHz. En este caso, las pérdidas son menores que 1 dB para velocidades del viento menores de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , aumentando hasta los 10 dB para velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y superiores, lo que demuestra la gran influencia del viento en las pérdidas por rebote en la superficie. Finalmente, la figura 3.10 (c) muestra la variación respecto al ángulo de incidencia para una velocidad del viento de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y una frecuencia de 30 kHz. En esta figura se puede observar cómo las pérdidas aumentan a medida que la onda acústica incide de manera más perpendicular a la superficie del mar, alcanzando valores de 10 dB para ángulos de  $50^\circ$ .

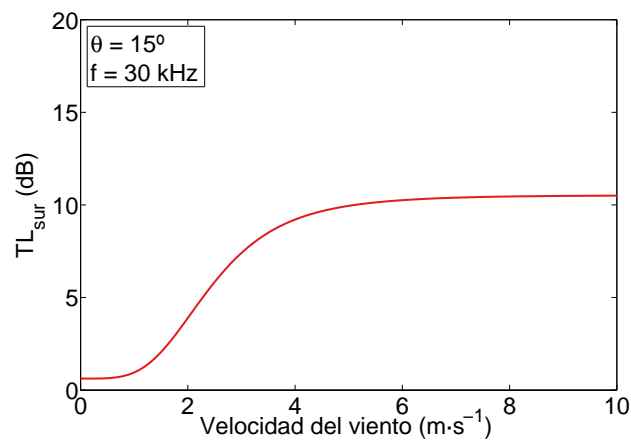
Según se puede apreciar en estas gráficas, las pérdidas de transmisión por rebotes en la superficie no suelen superar los 10 dB, mostrando un valor muy variable entre los 10 y los 100 kHz, siendo este el rango de frecuencias de las señales empleadas en este trabajo, y entre los 0 y  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , situación ambiental bastante común. Estos resultados, junto al mostrado en la figura 3.9, justifican la necesidad de considerar un modelo de pérdidas de transmisión por rebotes en la superficie, dado el rango de valores de frecuencias y parámetros medioambientales que se pueden encontrar habitualmente en la realidad. Hay que notar que la ecuación (3.38) proporciona las pérdidas de transmisión por cada rebote, por lo que es necesario aplicarla en el modelo cada vez que un rayo incide en la superficie del mar, teniendo en cuenta los valores de viento y frecuencia de la señal considerados, así como el ángulo de incidencia rasante del rayo en ese punto de reflexión.

## B. Reflexión en el fondo del mar

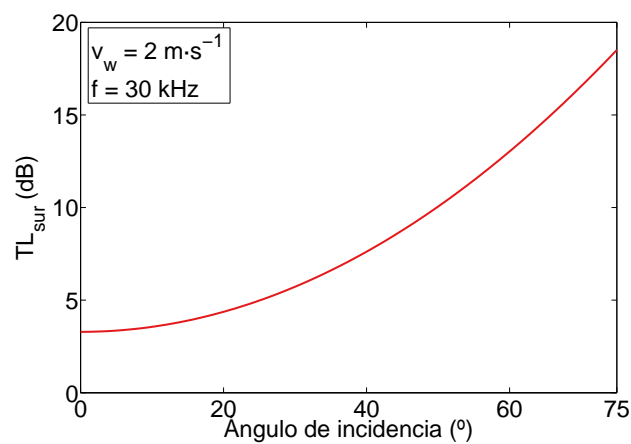
A diferencia de la superficie del mar, la relación de impedancias acústicas entre el agua y el material del fondo no es en general tan diferente como para asegurar que exista una reflexión perfecta donde toda la energía resulte reflejada. No obstante, existen diversos tipos de fondo con propiedades acústicas diferentes, por lo que hay que estudiar esta relación de



(a) Variación con la frecuencia



(b) Variación con la velocidad del viento



(c) Variación con el ángulo de incidencia

Figura 3.10: Variación de  $TL_{sup}$  respecto a la frecuencia ( $f$ ), velocidad del viento ( $v_w$ ) y ángulo de incidencia ( $\theta$ )



impedancias en cada caso. Adicionalmente, con la salvedad de algunas regiones, el fondo suele ser irregular, es decir, alejado de una superficie plana perfecta, produciendo un efecto de *scattering* análogo al de las reflexiones en la superficie, generando también un proceso de reverberación. Y por último, existe también un efecto de atenuación en el fondo y de absorción si existe una capa de sedimentos, donde esta absorción es dependiente de la porosidad del medio [Uri83]. Esta capa de sedimentos puede dar lugar además a fenómenos más complejos, como la aparición de un fenómeno de resonancia a determinadas frecuencias que puede provocar unas pérdidas de transmisión elevadas, o la aparición de ondas de Scholte, que son ondas superficiales que se propagan en la superficie de separación entre el agua y el fondo [Ain03].

Tener en cuenta todas estas contribuciones descritas anteriormente es extremadamente difícil y poco viable, puesto que requiere conocer con precisión detalles de la composición del fondo marino que no son sencillos de obtener para todo el entorno en el que se propaga la señal (que en distintas aplicaciones puede ser de varias decenas de kilómetros), por lo que estas pérdidas de energía son complejas de predecir.

A finales de la década de 1960 se realizaron varias campañas de medida para caracterizar las pérdidas de transmisión por rebote en el fondo en diversas zonas. El valor medio de las medidas en relación al ángulo de incidencia superaba los 10 dB para una de las localizaciones para todos los ángulos, y en la otra localización, los superaba a partir de los 60°. No obstante, se hace énfasis en el hecho de que los valores individuales obtenidos difieren considerablemente de esta media, lo que refleja la complejidad de calcular estas pérdidas de transmisión [Uri83].

De manera teórica, las pérdidas se calculan de manera análoga a la ecuación (3.37). Sin embargo, para simplificar el problema se usan ecuaciones como la de Rayleigh (3.39) [Uri83], formulada en 1945, que permite calcular estas pérdidas de transmisión en el fondo en función de parámetros sencillos de estimar. Esta ecuación describe las pérdidas de transmisión que sufre una señal acústica de cierta intensidad que pasa de un fluido con una densidad  $\rho_w$  y velocidad del sonido  $c$ , a otro fluido con densidad  $\rho_b$  y velocidad del sonido  $c_b$ , en función del ángulo de incidencia rasante,  $\theta_b$ :

$$TL_{fon} = 10 \log \left[ \frac{m \sin \theta_b - (n_c^2 - \cos^2 \theta_b)^{1/2}}{m \sin \theta_b + (n_c^2 - \cos^2 \theta_b)^{1/2}} \right]^2 \quad (dB/rebote) \quad (3.39)$$

donde  $m = \rho_b/\rho_w$  y  $n_c = c/c_b$ . Aunque está pensada para obtener las pérdidas entre dos fluidos, también está aceptada para calcular las pérdidas por la incidencia de una onda acústica desde el agua, con densidad  $\rho_w$  y velocidad del sonido  $c$ , al material del fondo, con densidad  $\rho_b$  y velocidad del sonido  $c_b$ . Tal y como refleja (3.39), los parámetros clave son la densidad del fondo, así como la velocidad del sonido en éste y el ángulo de incidencia rasante, por lo que fondos de distinta composición ocasionarán pérdidas de transmisión diferentes para el mismo ángulo de incidencia. La tabla 3.4 recoge los valores de densidad y velocidad del sonido para algunos fondos típicos [JKPS11].

Tipo de fondo	Densidad (kg·cm <sup>-3</sup> )	Velocidad del sonido (m·s <sup>-1</sup> )
Barro	1536	1510
Limo	1741	1575
Arena	1946	1650
Caliza	2253	2400
Basalto	2765	5250

**Tabla 3.4:** Propiedades de distintos materiales que componen el fondo marino [JKPS11]

Utilizando estos valores, se han calculado las pérdidas de transmisión en el fondo en función del ángulo de incidencia rasante para estos materiales, recogiendo estos resultados en la figura 3.11. Se pueden sacar dos grandes conclusiones en base a estos resultados:

- Las pérdidas de transmisión varían notablemente en función de la composición del fondo. Medios más densos, con una mayor impedancia acústica, presentan una diferencia de impedancia con el agua más notable, de manera que muestran un comportamiento similar al de la superficie del mar, provocando reflexiones que prácticamente no sufren pérdidas de energía. Otros medios como el barro, con una impedancia acústica similar a la del agua, son más permeables y transmiten más energía al fondo, originando más pérdidas en la señal acústica.
- Para ángulos de incidencia rasante inferiores a un determinado ángulo crítico no se obtienen pérdidas de transmisión en el fondo. Este ángulo crítico depende de las propiedades del material, de manera que mientras más denso sea, más perpendicular debe incidir la señal acústica para que pierda energía.

Según estos resultados, las pérdidas en los peores casos oscilan entre 2 y casi 5 dB por rebote, según sea el fondo sea de arena o barro. El efecto de la atenuación en el fondo, que no está contemplado en el modelo de Rayleigh, provoca un suavizado del comportamiento de las pérdidas de transmisión, aportando una cierta cantidad de pérdida de energía extra, incluso para ángulos menores que el crítico. No obstante, este fenómeno no ha sido considerado todavía en el modelo, al considerarse un efecto de segundo orden en la interacción de la señal con el fondo. Al igual que las pérdidas en la superficie, hay que hacer notar que las pérdidas en el fondo se deben calcular para cada rayo que rebote en el fondo.

### 3.3. Efectos dinámicos en el canal subacuático

En la sección 3.2.3 se ha puesto de manifiesto la importancia que tiene la superficie del mar como mecanismo generador de pérdidas de energía en función del ángulo de incidencia

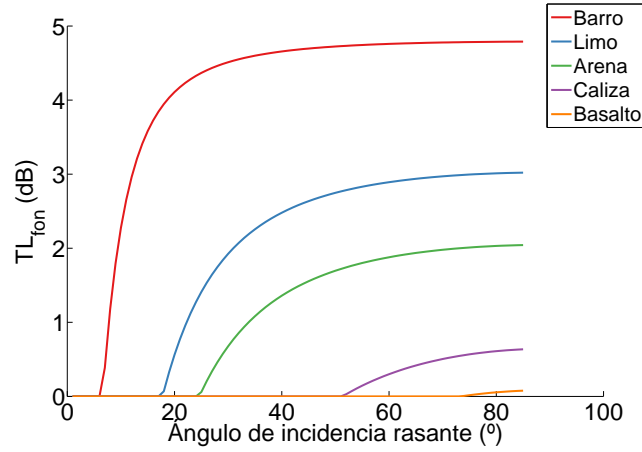


Figura 3.11: Variación de  $TL_{fon}$  respecto al ángulo de incidencia rasante  $\theta_b$ , de acuerdo con la ecuación de Rayleigh (3.39)

rasante en la superficie, la frecuencia de la señal y la velocidad del viento. La influencia del viento y el oleaje generado por éste es más compleja en la realidad que considerarlo únicamente como una fuente de pérdidas de energía. Además de este efecto, el oleaje generado por el viento provocará dos fenómenos de importancia para la transmisión de señales acústicas, como son el ensanchamiento del espectro de la señal reflejada, así como un desvanecimiento de ésta [RC70].

En lo que respecta al ensanchamiento del espectro, éste se debe al movimiento de la superficie del mar durante el proceso de reflexión de la onda acústica, superponiendo la frecuencia del movimiento vertical del oleaje a la de la señal [Uri83]. Este efecto origina un ensanchamiento del ancho de banda de la señal incidente, denominado ensanchamiento Doppler (*Doppler spread*), que se puede expresar según (3.40) [BL03, Sto03]

$$B_D = 0.0175 \left( \frac{f}{c} \right) v_w^{3/2} \cos \theta \quad (Hz) \quad (3.40)$$

donde  $f$  es la frecuencia de la onda en Hz,  $c$  la velocidad del sonido en  $m \cdot s^{-1}$ ,  $v_w$  la velocidad del viento en la superficie en  $m \cdot s^{-1}$ , y  $\theta$  el ángulo de incidencia en la superficie.

Tal y como refleja la ecuación (3.40), el ensanchamiento Doppler que sufre la señal reflejada depende directamente del viento en la superficie, que es el que provoca el oleaje, es decir, la rugosidad o irregularidad en dicha superficie. Depende también directamente de la frecuencia de la señal, puesto que para frecuencias menores la longitud de onda de la señal se vuelve grande comparada con el tamaño geométrico de las irregularidades en la superficie, por lo que este efecto es menor. Finalmente, depende inversamente con el ángulo de incidencia. Para ángulos bajos, es decir, incidencias prácticamente perpendiculares, la interacción de la señal con la superficie del mar es mucho mayor y el coseno vale prácticamente la unidad, maximizando este efecto. La figura 3.12 muestra la variación del ensanchamiento Doppler con el viento, para frecuencias de 500 Hz y de 20 kHz, y

considerando un ángulo de incidencia de  $20^\circ$  o de  $40^\circ$ . La velocidad del sonido se considera constante con un valor de  $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Esta figura refleja la importancia del ángulo de incidencia en el ensanchamiento Doppler, aunque muestra más especialmente su elevada dependencia con la frecuencia. Mientras que para una frecuencia de  $500 \text{ Hz}$  el ensanchamiento Doppler no supera  $1 \text{ Hz}$  incluso para vientos de  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a frecuencias de  $20 \text{ kHz}$  el ensanchamiento Doppler puede tomar valores de hasta  $20 \text{ Hz}$ , para vientos de  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nuevamente, la influencia de este efecto se hace notar a las frecuencias usuales que se emplearán en este trabajo. Como es un fenómeno que puede estar presente en cualquier transmisión en entornos subacuáticos en exteriores, se ha considerado que es lo suficientemente importante como para ser incluido en el modelo.

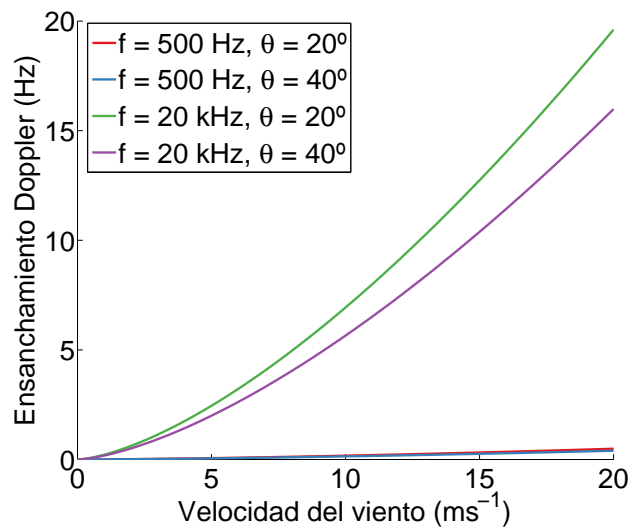


Figura 3.12: Variación del ensanchamiento Doppler con la frecuencia ( $f$ ) y el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) según (3.40)

Además del ensanchamiento Doppler, el oleaje también provoca el desvanecimiento de la señal, es decir, fluctuaciones de amplitud debido a la interacción de la señal con la superficie del mar, al encontrarse la onda incidente con una superficie cambiante en su forma en el proceso de reflexión. Estas fluctuaciones se han llegado a detectar incluso para señales de frecuencia de  $168 \text{ Hz}$  para transmisiones desde el fondo a la superficie e incidencias casi perpendiculares [BR60].

Estas fluctuaciones de la amplitud se pueden relacionar con el parámetro de Rayleigh según (3.41), en virtud de las medidas experimentales realizadas por Gulin y Malyshev en 1963 para  $108 \text{ Hz}$ , y por Brown en 1974, para cuatro frecuencias comprendidas entre los  $160$  y  $1.36 \text{ kHz}$  [Uri83].

$$\begin{aligned}
 V &= 0.5R & R &\ll 1 \\
 V &= 0.5 & R &\gg 1
 \end{aligned}
 \tag{3.41}$$

Las ecuaciones en (3.41) muestran que para valores elevados del parámetro de Rayleigh, la fluctuación, dada por el parámetro  $V$ , tendrá un valor de 0.5. Esta situación es la representada por una superficie del mar rugosa, y que tal y como se mostró en la figura 3.9, será la habitual para las frecuencias de señal empleadas en este trabajo. Este valor de 0.5 es muy similar al proporcionado por una distribución Rayleigh, cuyo parámetro  $V$  tiene un valor de 0.52 [Uri83]. Estos resultados indican que la señal reflejada en la superficie del mar sufre un proceso de desvanecimiento donde la amplitud se modula siguiendo una distribución Rayleigh. Adicionalmente, diversas medidas realizadas en 1968 por Urick, Lund y Bradley muestran cambios de fase en la señal reflejada por la superficie del mar [ULB69].

Por este motivo, cada una de las componentes de la señal recibida que proviene de un camino con al menos una reflexión en la superficie, se calculan utilizando una función interna de Matlab denominada `rayleighchan` [Isk08]. Esta función aplica un desvanecimiento en amplitud de tipo Rayleigh a la señal incidente, así como un cambio de fase aleatorio entre  $-\pi$  y  $\pi$ , lo que replicaría el comportamiento dinámico observado para este tipo de señales y permite su cálculo de una manera sencilla. Esta función necesita cuatro parámetros de entrada:

- La frecuencia de muestreo de la señal de entrada,  $f_s$ , que es un dato de entrada al modelo.
- El máximo ensanchamiento Doppler sufrido por la señal,  $B_D$ , calculado según 3.40 para cada rebote, quedándose con el máximo.
- Una matriz con los retardos de los diferentes caminos, si se quiere aplicar esta función a varias señales a la vez, en el caso de que sufran al mismo ensanchamiento Doppler.
- Una matriz con la ganancia media en potencia de los distintos caminos a los que se aplica este desvanecimiento.

No obstante, el movimiento de la superficie del mar no es el único efecto dinámico del medio. El movimiento del emisor y el receptor provocará un desplazamiento Doppler en la señal y un desvanecimiento de la amplitud en la señal recibida. Este efecto se debe al cambio en el patrón de multicamino y por tanto en la interferencia que sufre la señal. También pueden existir turbulencias, es decir, regiones con diferentes valores de temperatura y densidad, así como corrientes marinas, mareas, ondas internas, tormentas sobre la superficie del mar e incluso grupos de peces, que pueden provocar un desvanecimiento en la señal recibida y una alteración del camino recorrido si la señal atraviesa esta región [ULB69, Uri83]. Estos efectos no han sido considerados todavía en el modelo debido a que la mayoría de ellos son fenómenos muy específicos y locales, presentando una gran variabilidad en su influencia. No obstante, los que se han considerado más relevantes se describen brevemente en el apéndice A.

### 3.4. Ruido ambiental

El medio subacuático está afectado por distintos tipos de ruido, que aportan cierta intensidad acústica observable en los hidrófonos. Dentro del ruido presente en el medio se distinguen varias contribuciones:

- El ruido debido al propio sistema (*self-noise*), es decir, el producido por el hidrófono y su montaje, como puede ser la fricción de los cables.
- El ruido debido a fuentes localizables en la zona.
- Ruido ambiental, que es el que queda cuando todas las fuentes anteriores han sido eliminadas.

De todas estas contribuciones la que reviste mayor interés para el estudio de la fenomenología presente en el canal subacuático es la tercera, el ruido ambiental, ya que se debe al propio medio subacuático a diferencia de las dos primeras, que son debidas a agentes externos o localizables. El ruido debido a un sistema de medida se puede caracterizar y filtrar, y el debido a fuentes localizables en la zona puede ser minimizado en gran parte, como por ejemplo el generado por el barco que pueda llevar el hidrófono que está realizando la medida, si se apaga el motor. El ruido ambiental por tanto, es aquel que un hidrófono escucharía de manera natural, si no hubiera fuentes externas actuando y habiendo eliminado el ruido del sistema.

Se define el nivel de ruido ambiental como la intensidad, en decibelios, de la señal escuchada en un hidrófono omnidireccional, referida a la intensidad de una onda plana con un valor rms de presión acústica de  $1 \mu\text{Pa}$ . Estos niveles se suelen reducir a una banda de frecuencia de 1 Hz, por lo que se suele hablar de niveles espectrales de ruido ambiental [Uri83].

Diferentes medidas realizadas en aguas profundas han permitido caracterizar los niveles de ruido ambiental en un espectro de frecuencias que abarca desde 1 Hz a los 100 kHz, mostrando un comportamiento diferente en función de la región en frecuencia que se esté considerando. Esto sugiere que existen distintas contribuciones al ruido ambiental, dominando unas sobre otras en función de la región del espectro donde se esté trabajando [Wen62].

Una de las primeras fuentes de ruido a considerar sería la provocada por los cambios de presión generados por las mareas. Este efecto se hace notar en hidrófonos que responden a cambios en la presión (sea de origen acústico o no), o en transductores piezoeléctricos debido al aumento en la tensión provocado por un aumento en la temperatura, que a su vez puede venir de los cambios en la columna de agua debido al efecto de las mareas. Este efecto origina ruido a una frecuencia muy baja del espectro, por debajo del hercio [Uri83].

Otra contribución al ruido en baja frecuencia se debe al movimiento del fondo marino en lo que se denominan microsismos (*microseisms*) [Uri74]. Estos microsismos pueden generar niveles de ruido de hasta 120 dB, lo que se corresponde con los niveles de ruido medidos por debajo de una frecuencia de 1 Hz, aunque su influencia puede llegar hasta los 100 Hz. Las erupciones volcánicas y terremotos son también una fuente de ruido acústico, aunque son un fenómeno muy localizado en el tiempo.

Wenz estudio el efecto de las turbulencias como fuente de ruido acústico [Wen62]. Estas turbulencias serán importantes si el hidrófono se encuentra dentro de la región donde están teniendo lugar, provocando variaciones de presión de manera análoga a las provocadas por las mareas. Wenz caracterizó este ruido en función de una componente de turbulencia presente en una determinada corriente marina, obteniendo niveles de ruido que oscilan entre los 116 dB y los 133 dB para corrientes de 2 y 30 cm·s<sup>-1</sup>, respectivamente. Este efecto es especialmente importante para la banda de frecuencia comprendida entre 1 y 10 Hz, aunque se puede extender también hasta los 100 Hz, si la corriente marina es importante.

A esta frecuencia aparece también un ruido que presenta un espectro muy plano en esta región, y que coincide con el ruido emitidos por barcos lejanos. Debido a las características del canal y la frecuencia de esta señal, este ruido puede propagarse a largas distancias sin perder mucha energía en el proceso, no siendo posible además eliminar esta fuente en recepción, al encontrarse alejada del hidrófono. Se considera a los barcos lejanos como la fuente de ruido principal dentro de la banda de frecuencias comprendida entre los 50 y los 500 Hz [Uri83], aunque Wenz lo extiende hasta 1 kHz [Wen62].

La superficie del mar genera ruido a través de distintos procesos. Por un lado, el oleaje genera cambios en la presión recibida en un hidrófono de manera análoga al efecto de las mareas, aunque su contribución disminuye rápidamente a medida que aumenta la profundidad a la que se sumerge el hidrófono. Por otro lado, la interacción de dos ondas que se propagan en la superficie del mar y que viajan en sentidos opuestos da lugar a una onda estacionaria que contribuye con cierto nivel de ruido en el entorno, donde esta contribución no desaparece con la profundidad y se hace notar a bajas frecuencias. Marsh calculó esta contribución [Mar63], obteniendo que el valor rms de presión por unidad de frecuencia,  $p_f^2$ , se puede obtener en función de la frecuencia acústica en Hz,  $f$ , y la altura media de la ola,  $H_w$ , medida desde la base hasta la cresta, en pies (ft), donde 1 ft = 0.3048 m, según

$$\begin{aligned} p_f^2 &= 94H_w^{6/5}f^{-3}, \quad (1 \leq f \leq 13.5) \\ &= 2.9H_w^{6/5}f^{-5/3}, \quad (13.5 \leq f) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Otra contribución de la superficie del mar al ruido ambiental es aquella generada por el viento en la región donde está localizado el hidrófono. Este ruido se hace notar en una banda entre los 500 Hz y los 25 kHz, y existen varias causas posibles, como el ruido generado por las olas al romper, el ruido que se acopla de la atmósfera al agua al soplar el viento, o la explosión de las burbujas generadas por las olas al romper. Este último fenómeno fue estudiado por

Furduev y se cree que produce el ruido en la banda de frecuencias comprendidas entre los 100 Hz y 1 kHz [Uri83]. Estudios más recientes como el de Oguz modelan el ruido generado por las olas al romper, que a su vez generan una distribución de burbujas [Ogu94], identificando esta contribución como una de las más importantes en la banda de 50 Hz a 1.5 kHz. No obstante, la relación entre el viento en la superficie, los parámetros físicos que definen las olas (como su altura) y el valor de ruido medido, es compleja de obtener, aunque los resultados experimentales muestran una buena correlación entre el nivel espectral de ruido y el valor rms del viento en el punto de medida [FW95].

Para frecuencias más elevadas, las propias moléculas del agua imponen un umbral en la sensibilidad del hidrófono. Este fenómeno se conoce como ruido térmico (*thermal noise*), y presenta características análogas al ruido térmico (o ruido de Nyquist) en los conductores, que se produce por la agitación de los portadores de carga. Este ruido es prácticamente blanco, y presenta una distribución Gaussiana [Man02]. Para un hidrófono omnidireccional que convierte toda la energía que transmite la onda acústica en energía eléctrica, el nivel espectral de ruido térmico,  $NL_{th}$ , viene dado por [Uri83]

$$NL_{th} = -15 + 20 \log f \quad (3.43)$$

donde la frecuencia de emisión  $f$  está expresada en kHz. Como referencia, para una frecuencia de 30 kHz, el nivel espectral de ruido es de aproximadamente 14.5 dB.

Las contribuciones mejor caracterizadas se han recogido en la figura 3.13, que muestra los niveles de ruido en relación con la frecuencia, para un entorno de aguas profundas [Uri83]. Se han marcado diversas regiones, donde en cada una de ellas la fuente dominante varía, según lo expuesto anteriormente. La región I, situada por debajo de 1 Hz, no se ha representado por ser la más variable y menos conocida de todas ellas.

Hasta ahora se ha hablado de fuentes de ruido que se encuentran relativamente bien caracterizadas, y esto suele ocurrir en aguas profundas. Para regiones costeras, además de la acción del viento, cuyos efectos son similares, las principales contribuciones se deben a la industria y los barcos, y al ruido de origen biológico. Todas estas fuentes de ruido son extremadamente variables, lo que provoca que la caracterización de los niveles de ruido en estas regiones sean muy complejas. Sin embargo, en ausencia del ruido provocado por la industria, los barcos y las diversas especies marinas, los niveles de ruido se muestran muy similares a los obtenidos en aguas profundas [Uri83].

Las fuentes de ruido son extremadamente variables, puesto que la fauna marina muestra un comportamiento diferente a lo largo del día, al igual que la actividad industrial o el viento. Además, las condiciones del perfil de velocidad del sonido también pueden variar, afectando a la propagación del ruido y por tanto, a su efecto en una determinada región. Adicionalmente, existen otras fuentes de ruido que tienen una naturaleza intermitente, como es el ruido ocasionado por la lluvia [Fra59], el uso de explosivos en entornos subacuáticos o terremotos y erupción de volcanes. En lo que respecta a la lluvia, en condiciones de lluvia intensa se han llegado a registrar aumentos de hasta 30 dB en el nivel espectral de ruido,



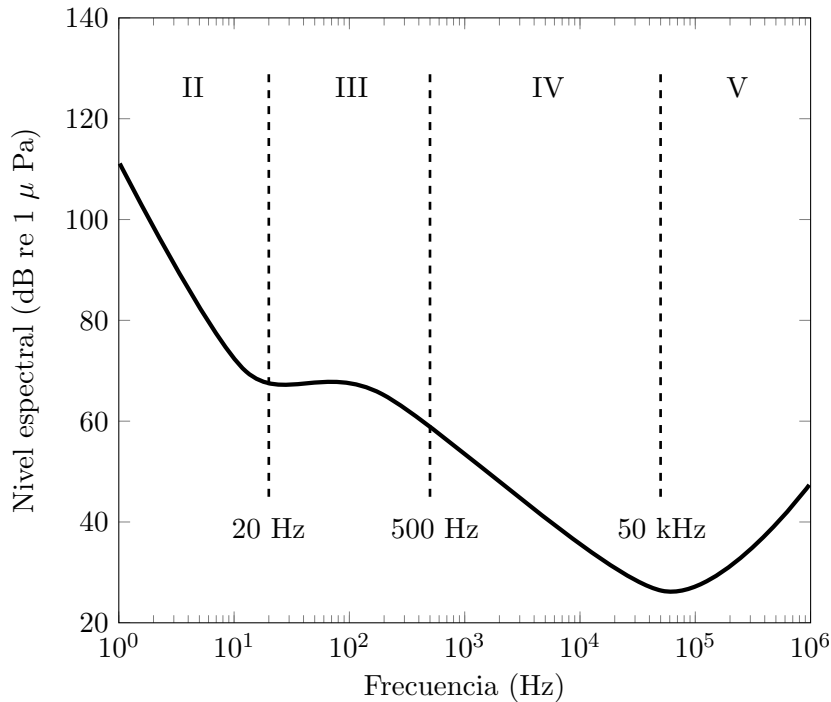


Figura 3.13: Nivel espectral genérico de ruido para entornos de aguas profundas [Uri83]

en la región entre 5 y 10 kHz del espectro [Uri83].

Tal y como se ha recogido en esta sección, el ruido ambiental presenta numerosas contribuciones y éstas son además extremadamente variables. Adicionalmente, el ruido no es isotrópico sino que presenta cierta direccionalidad [Uri83]. A lo largo de las últimas décadas se han publicado diversos estudios sobre los niveles de ruido en entornos subacuáticos así como sus causas y efectos, lo que demuestra que es un campo muy complejo y que presenta un gran interés para la comunidad, desarrollándose modelos de propagación de ruido complejos como CANARY [Har97], basado en trazado de rayos y que recoge diversas fuentes como el viento, la lluvia o el producido por grupos de barcos y su efecto sobre un array de hidrófonos. En los últimos años se está poniendo un especial empeño en minimizar la acción del hombre en lo que respecta al ruido para perturbar lo menos posible a la fauna marina [JT03, SH06].

Por lo general, una vez alejado de la superficie del mar, el ruido muestra una distribución de amplitud Gaussiana [Cal64], especialmente cuando la acción de efectos más específicos como la rotura de placas de hielo, o el ruido biológico y el ruido generado por los barcos no presente valores máximos, y siempre y cuando estos efectos no tengan lugar cerca del receptor. Cerca de la superficie en cambio, esta distribución es más compleja y aparecen algunos picos en el ruido debido a la acción local de ciertos efectos ya mencionados. Realizar un modelo de ruido tan exhaustivo se escapa de los objetivos de esta tesis.

A la vista de estos resultados se ha optado por la inclusión de un modelo de ruido sencillo basado en la adición de ruido blanco Gaussiano, definido a partir de una determinada

relación señal a ruido (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR). Esta relación señal a ruido se define, en este trabajo, según (3.44), donde  $E_b$  es la energía por bit y  $N_0$  es la densidad espectral de potencia del ruido.

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \quad (3.44)$$

Debido a que las frecuencias de interés de este trabajo se sitúan entre las bandas IV y V de la figura 3.13, se asume que la consideración de ruido blanco Gaussiano no introducirá mucho error para el estudio realizado en este trabajo, al ser la banda de frecuencias donde el ruido tiene menos peso, además de mostrar poca variación en sus niveles en relación a la frecuencia.

### 3.5. Descripción del funcionamiento del modelo

Una vez realizada una descripción de los distintos fenómenos físicos que tienen lugar en el medio subacuático, en esta sección se describirá el funcionamiento del modelo de propagación acústica desarrollado. Este modelo ha sido programado en el entorno Matlab, debido a la flexibilidad que presenta esta plataforma para la programación del código y la visualización de resultados, teniendo en cuenta que el modelo no será usado en tiempo real.

El objetivo del modelo es obtener una función de transferencia que represente la respuesta del canal bajo unas determinadas condiciones medioambientales y configuración del sistema. De esta manera, una vez que se obtiene la función de transferencia del canal, ésta se puede aplicar a una señal de entrada para obtener la señal recibida, donde esta señal ha sufrido diversos efectos distorsionadores debidos al canal subacuático. La señal recibida ya contiene también el ruido del entorno, que se aplica a la salida del canal, según se muestra en la figura 3.14.

Esta acción distorsionadora del canal es de gran importancia para el trabajo desarrollado en esta tesis, puesto que serán necesarias transmisiones acústicas para el funcionamiento del sistema de posicionamiento que se describirá posteriormente en el capítulo 4. Los resultados obtenidos con el modelo permitirán estudiar una primera aproximación al comportamiento del sistema bajo distintos efectos del canal.

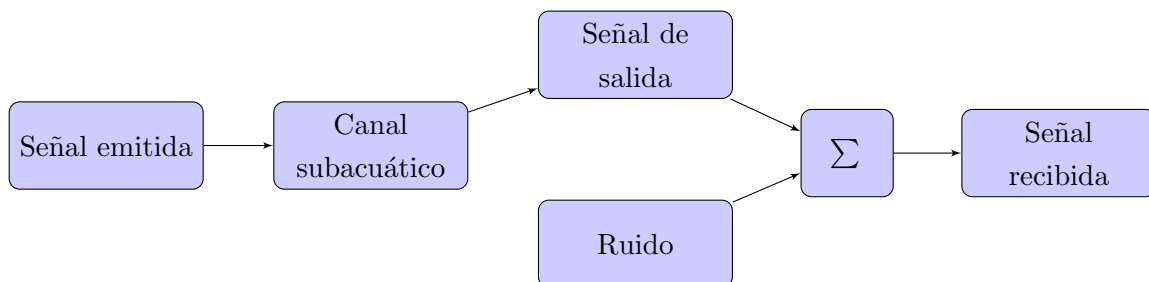


Figura 3.14: Esquema de la simulación de una transmisión acústica en el modelo

La figura 3.15 muestra el diagrama de bloques para el proceso de obtención de la función de transferencia. Se parte de diversos datos de entrada, que se muestran divididos en dos categorías: los datos del entorno, que son aquellos que provienen de medidas o del conocimiento de ciertas propiedades del entorno que se quiere simular, y datos del sistema, que son los datos del equipo de medida. Los datos del entorno que considera el modelo, son:

- Las densidades de agua,  $\rho_w$ , y del fondo,  $\rho_b$ .
- La velocidad del sonido en el material del fondo,  $c_b$ .
- La temperatura,  $T$ , a lo largo de la columna de agua, o el perfil de velocidad del sonido, si se ha medido con un sensor CTD (del inglés *Conductivity-Temperature-Depth*).
- La salinidad,  $S$ .
- El  $pH$  del agua.
- La relación señal-ruido (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR), asumiendo ruido blanco Gaussiano.
- El perfil de batimetría, esto es, la variación de la profundidad con la distancia, en la línea que une al emisor con el receptor.
- Velocidad del viento en la superficie,  $v_w$ .

Y los datos del sistema:

- Distancia entre emisor y receptor y las profundidades de ambos.
- Patrón angular del emisor.
- Frecuencia de la señal emitida,  $f$ .
- Frecuencia de muestro del sistema,  $f_s$ .
- La señal a emitir.

Con estos datos de entrada, el primer paso es calcular el perfil de velocidad del sonido para toda la columna de agua, en el caso de que se haya introducido la temperatura a lo largo de dicha columna de agua como dato de entrada, utilizando para ello la ecuación de Chen y Millero (3.15). A continuación se procede a calcular también el coeficiente de absorción para la columna de agua, mediante la ecuación de François y Garrison (3.34).

Una vez que se tiene esta información, se efectúa el trazado de rayos en el entorno definido. Este trazado se realiza en dos dimensiones, en el plano vertical que contiene al emisor y al receptor. El trazado de rayos aporta información sobre el camino seguido por cada uno de los rayos, como la distancia que recorren en el medio o el número de rebotes

en el fondo y la superficie del mar, además de la evolución de la posición del rayo en el entorno. Conociendo esta distancia recorrida y el perfil de la velocidad del sonido, se puede calcular el tiempo que tarda cada uno de estos caminos en llegar desde el emisor al receptor, pudiendo reconstruir así el patrón de multicamino en recepción.

A medida que se realiza el trazado de rayos se calcula la contribución de los distintos efectos contemplados en el modelo. Estos efectos ocasionan pérdidas de energía en la señal emitida, recogidas en las pérdidas de transmisión calculadas según la ecuación (3.22), donde se ha empleado la ecuación de Beckmann y Spizzichino (3.38) para obtener las pérdidas por rebote en la superficie del mar, y la ecuación de Rayleigh (3.39) para calcular las pérdidas por rebote en el fondo. Adicionalmente, se calcula también el ensanchamiento Doppler según (3.40) y cambios en la amplitud y fase en las señales que rebotan en la superficie del mar, debido al desvanecimiento producido por el oleaje generado por el viento, según se comentó en la sección 3.3.

Cuando se ha calculado el efecto de estas contribuciones para cada uno de los rayos, se identifican aquellos que inciden en el receptor y se calcula entonces la función de transferencia que representa el comportamiento del canal. Para calcular esta función de transferencia, a las señales que rebotan en la superficie se les aplica la función rayleighchan para considerar su comportamiento dinámico según se detalló en la sección 3.3, mientras que a las demás sólo se les aplica la atenuación debida a las pérdidas de transmisión. Una vez que se tiene la función de transferencia, se aplica a la señal emitida y se suma a continuación ruido blanco Gaussiano para obtener finalmente la señal recibida.

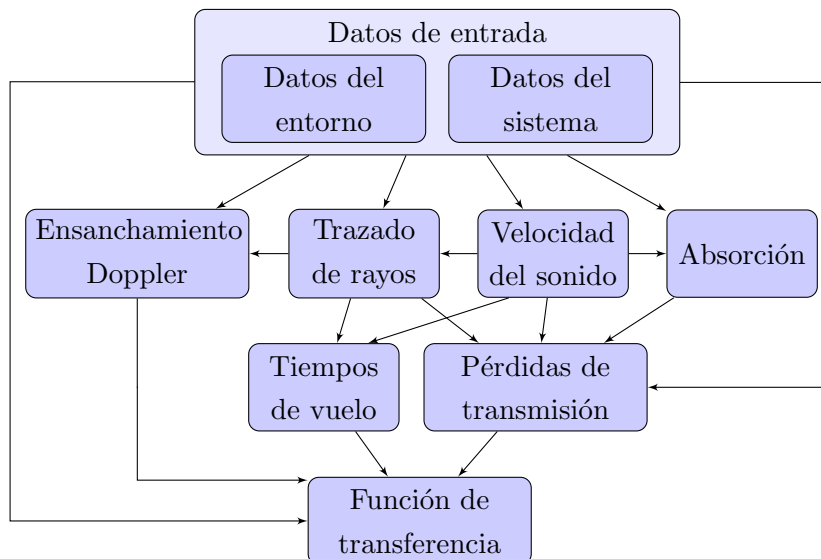


Figura 3.15: Diagrama de bloques del modelo

### 3.5.1. Implementación del trazado de rayos

En esta sección se explicará cómo se ha implementado en el modelo el cálculo del trazado de rayos. El modelo desarrollado no resuelve las ecuaciones diferenciales de trazado de rayos, sino que en su lugar emplea una aproximación geométrica. Para ello, se divide la columna de agua en distintas capas de idéntico grosor, asignando entonces a cada una de estas capas un valor de velocidad del sonido, calculada según la ecuación de Chen y Millero (3.15), presentada en la sección 3.1. El coeficiente de absorción, calculado según la ecuación de François y Garrison (3.34), también se calcula para cada capa, debido a su dependencia con la presión (equivalente a la profundidad y, por tanto, a la capa donde se encuentre el rayo), y la velocidad del sonido.

Los rayos se lanzan desde el emisor, con un número y entre unos ángulos definidos por el usuario, donde estos valores proporcionarán el ángulo de salida de cada rayo en el entorno. En el modelo, se considera que un ángulo positivo indica que el rayo se propaga hacia la superficie del mar, mientras que un ángulo negativo implica que se propaga hacia el fondo. Dentro de una capa, un rayo se propaga en línea recta, puesto que la velocidad del sonido se considera constante dentro de ella. Conociendo la posición inicial del rayo (que será la del emisor al inicio del trazado, o posteriormente la posición en una determinada capa), el ángulo y el espesor de las capas, se calcula la posición final en la siguiente capa mediante la intersección de dos rectas.

Si existe un cambio en la velocidad del sonido entre la capa actual, con velocidad  $c_1$  y la siguiente, con velocidad  $c_2$ , el nuevo ángulo del rayo,  $\theta_2$ , cambiará siguiendo la Ley de Snell, según (3.45) [Lei98]. Este cambio en el ángulo del rayo refleja la curvatura de la onda acústica debida al perfil de la velocidad del sonido, tal y como se refleja en la figura 3.16. En dicha figura, la posición final se convierte en la inicial para el cálculo de la nueva posición del rayo, donde ahora el ángulo de partida vendrá dado por  $\theta_2$ .

$$\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2} \quad (3.45)$$

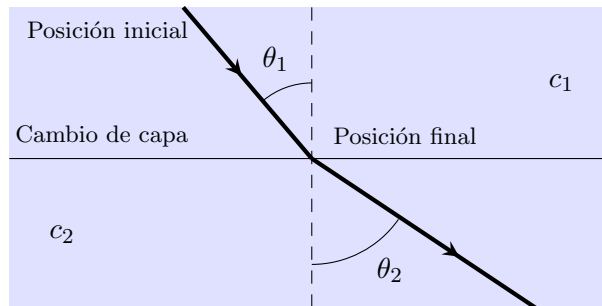


Figura 3.16: Curvatura del rayo debido a la Ley de Snell

En cada intersección cada rayo obtiene una nueva coordenada  $(x_i, z_i)$ , donde la

coordenada  $x_i$ , que siempre será mayor que  $x_{i-1}$ , vendrá dada por el cómputo de la intersección entre las dos capas, y la coordenada  $z_i$  será la profundidad de la capa actual. Estas coordenadas se almacenan para todos los rayos, y el proceso se repite hasta que todos alcanzan la posición  $x_r$  donde se ubica el receptor.

El valor del espesor de las capas en que se divide la columna de agua es una relación de compromiso entre la exactitud del modelo y el tiempo de cómputo. Si se considera un valor elevado, como puede ser un espesor del orden del metro, se asume que durante ese tramo la velocidad del sonido es constante, y por tanto un rayo se propagará en línea recta durante ese tramo. Ésto puede provocar una estimación incorrecta del trazado, puesto que dependiendo de la forma del perfil de velocidad del sonido, la curvatura no será todo lo precisa que debería. Si por el contrario se emplea un valor pequeño para el espesor, como puede ser del orden del milímetro, se obtiene una gran precisión en el trazado, con la contrapartida de un elevado coste computacional.

Este tiempo de cómputo se incrementará también con la distancia entre emisor y receptor, puesto que los rayos tienen que atravesar una distancia mayor, así como con el número de rayos emitidos en el entorno y el ángulo de apertura. Como ejemplo de estos tiempos de cómputo, la figura 3.17 (a) muestra los tiempos en función del número de rayos, el espesor de la capa, la distancia entre emisor y receptor y la profundidad. Para ello se ha considerado una apertura constante, lanzando los rayos entre  $\pm 30^\circ$ , considerando que tanto emisor como receptor están a 5 m de profundidad. En la figura 3.17 (b) se ha ampliado la zona de las simulaciones que presentan menor tiempo de cómputo.

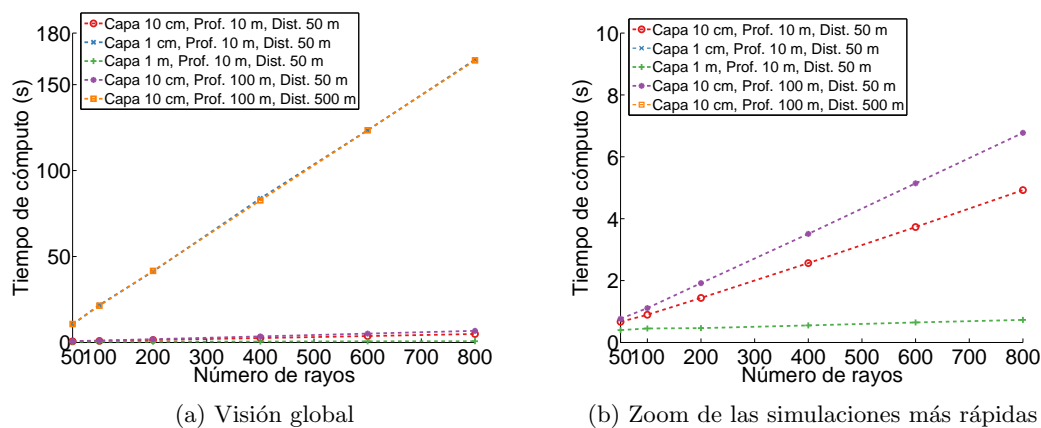


Figura 3.17: Comparativa de tiempos de cómputo para distintos espesores de capa, profundidades y distancias

Aunque el número de rayos afecta al tiempo de cómputo del modelo, se debe lanzar un número suficiente de ellos como para no perder información. Utilizar un número demasiado pequeño de rayos (del orden de decenas) puede provocar que todas las posibles propagaciones que tienen lugar en el entorno no estén representadas en el receptor. El valor óptimo de los rayos a lanzar dependerá del entorno considerado, pudiéndose realizar un estudio preliminar variando el número de rayos y comprobando el patrón de llegadas en el receptor,

detectando en torno a qué número de rayos satura el número de llegadas y no se obtiene más información. Como valor indicativo, un número de rayos entre 600 y 700 prácticamente asegura representar todas las posibles propagaciones en cualquier entorno.

En lo que respecta al cómputo de la posición de los distintos rayos, la superficie del mar se ha considerado plana para simplificar el cálculo del trazado de los rayos, aunque el modelo tiene en cuenta el oleaje provocado por el viento, tal y como se ha explicado en la sección 3.3. Se ha optado por esta decisión ante la gran complejidad que presenta representar la intersección con una superficie dinámica y variable en el tiempo, considerándose que las inexactitudes introducidas al considerar una superficie plana no van a ser mayores que las introducidas al considerar una forma que no representa fielmente a ésta. Cuando el modelo detecta que se ha incidido en la superficie del mar (la profundidad de dicha capa es cero), el nuevo rayo toma el mismo ángulo que en el estado anterior, pero con el signo cambiado. Además, se calcularía para dicho rayo las pérdidas de transmisión sufrida en el rebote mediante la ecuación (3.38).

La interacción con el fondo es más compleja. El modelo admite un perfil de batimetría (variación de la profundidad con la distancia), considerando un valor diferente de profundidad para cada valor de distancia introducido, midiendo esta distancia desde el emisor. Al igual que con las distintas capas o la superficie del mar, se calcula la posición en la que el rayo impacta en el fondo como la intersección de dos rectas, la del propio rayo y la recta formada entre dos valores contiguos de la batimetría, tal y como refleja la figura 3.18. El ángulo que se conoce del rayo es  $\theta_r$ , que es el de partida en la capa anterior a la incidencia en el fondo y que viene dado por un sistema de referencia con un eje paralelo a la superficie del mar y el otro perpendicular a él. Como el fondo no es paralelo a la superficie del mar ni a las capas en que se divide la columna de agua, el ángulo de incidencia en el fondo es  $\theta_b$ , que vendrá dado por  $\theta_b = \theta_r + \theta_{bat}$ , siendo  $\theta_{bat}$  el ángulo formado por la recta que definen los puntos que caracterizan la batimetría en el sector donde impacta el rayo. Según la ley de reflexión de Snell, el rayo reflejado saldrá con un ángulo  $\theta_b$ , al que hay que sumar de nuevo  $\theta_{bat}$  para volver al sistema de referencia original. Si el ángulo resultante es mayor que  $90^\circ$ , situación que representa a un rayo que vuelve hacia el emisor, se considera que ese rayo no llegará al plano del receptor, no computando más posiciones para él a partir de este punto.

La posición de los rayos se calcula desde su posición inicial en el emisor, hasta que llegan a la distancia donde se ubica el receptor, lo que permitirá visualizar su trayectoria. Un ejemplo de un trazado de rayos completo obtenido con el modelo de propagación desarrollado se muestra en la figura 3.19 (b), que representa la emisión de una señal acústica en el fiordo de Trondheim, Noruega. Para representar este caso se empleó un perfil de velocidad del sonido obtenido por un sensor CTD, mostrado en la figura 3.19 (a), y los datos de batimetría proporcionados por el sónar del barco. El emisor, equipado en un barco, se ubicó a 40 m de profundidad, situado en la izquierda de la figura, mientras que un array de receptores se montó en el puerto, a una distancia de 3696.9 m. Estos datos se tomaron durante la estancia

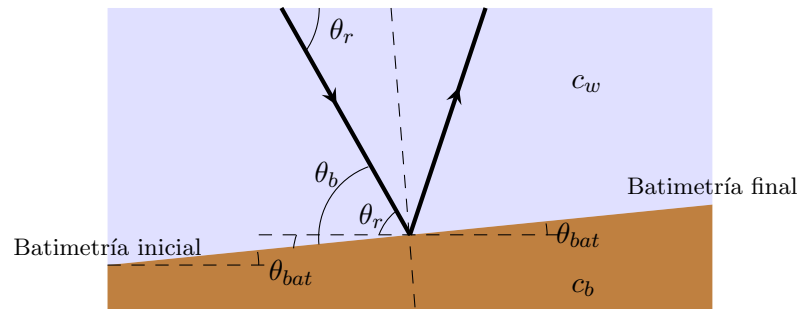


Figura 3.18: Ángulos de incidencia para la reflexión en el fondo

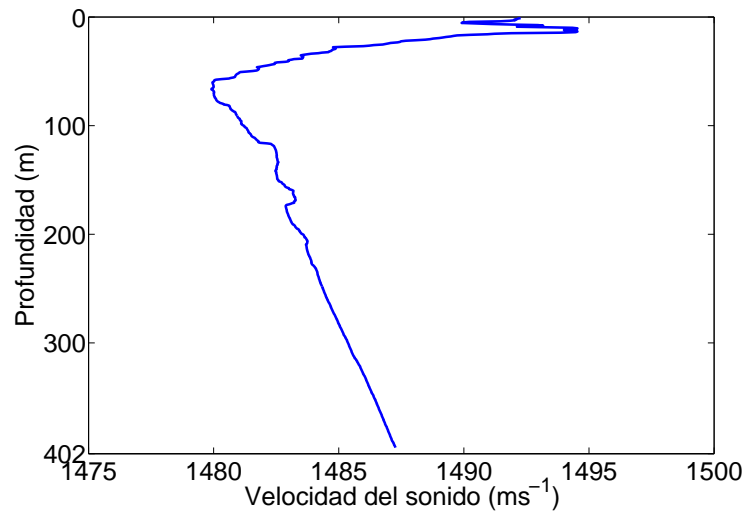
realizada en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología durante el año 2011.

Se puede apreciar la curvatura de los rayos debido a la acción del perfil de velocidad del sonido, así como la desaparición de muchos de los rayos emitidos, que se detienen al encontrarse con el desnivel que aparece entre el primer y el segundo kilómetro al tener un ángulo de reflexión mayor que  $90^\circ$ . En esta figura se puede apreciar también la enorme complejidad de la propagación acústica en entornos reales, donde la onda acústica puede sufrir numerosos rebotes en la superficie y el fondo, además de cambios de trayectoria debidos a la acción del perfil de velocidad del sonido y la batimetría.

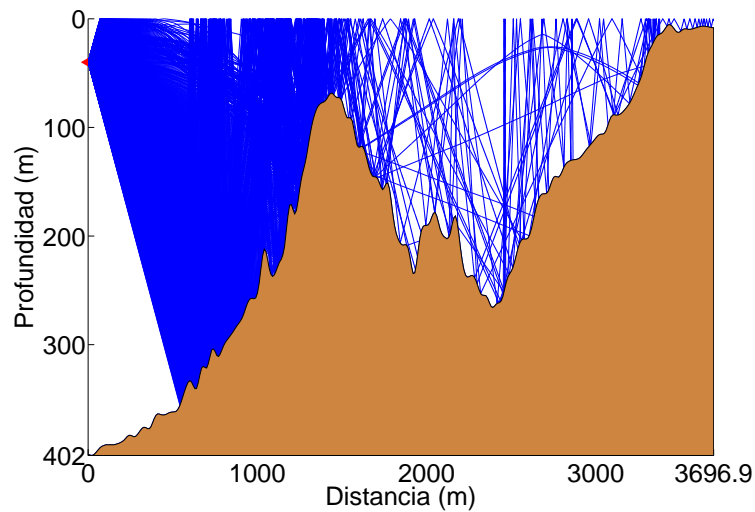
Cada vez que un rayo atraviesa una capa, se calcula el tiempo que ha tardado en propagarse de la anterior a la nueva, en función de la distancia recorrida entre las dos capas y el valor de velocidad del sonido de dicha capa. Este valor se va acumulando para obtener el tiempo de propagación total. En cada capa se calculan también las pérdidas de transmisión por absorción, mediante la ecuación de François y Garrison descrita en la sección 3.2.2, acumulándose de la misma manera que los tiempos de propagación al depender de la profundidad y por tanto, de la capa en la que se encuentre el rayo. Adicionalmente, cada vez que se detecta una incidencia de un rayo en la superficie del mar o en el fondo, se calculan las pérdidas de transmisión causadas por estos rebotes, de la forma detallada en la sección 3.2.3, acumulándose igualmente. La información del número de rebotes en la superficie y en el fondo y la distancia recorrida, así como el ángulo de partida y el de llegada, también son registrados por el modelo.

Cuando todos los rayos llegan a la distancia donde se encuentra el receptor, se procede a la identificación de llegadas, tal y como se ilustra en la figura 3.20. Las posiciones del emisor y del receptor se representan en la figura como dos triángulos rojos. Para detectar las llegadas, se agrupan los rayos contiguos de dos en dos, y se comprueba el número de rebotes en la superficie y en el fondo. Si los dos rayos muestran el mismo número de rebotes, se puede considerar que ambos forman parte de un mismo haz. Si el receptor se encuentra dentro de este haz, se asume que siempre existirá un rayo intermedio que tenga las mismas características de los otros dos con un ángulo intermedio, y que impactará en el receptor. Las propiedades de este rayo recibido (denominado en la literatura de habla inglesa como





(a) Perfil de velocidad del sonido



(b) Trazado de rayos

Figura 3.19: Perfil de velocidad del sonido (a) y trazado de rayos (b) para un entorno real en el fiordo de Trondheim, Noruega

*eigenray*), en lo que respecta a sus pérdidas de transmisión y al tiempo de vuelo, vendrán dadas por la interpolación de los valores de los dos rayos que forman el haz. Esta situación se representa en la figura 3.20 como el haz formado por los rayos en línea azul continua. Si por el contrario el receptor no se encuentra dentro de un determinado haz, se considera que no hay llegada proporcionada por esos caminos, situación representada por los rayos negros discontinuos. Este procedimiento se repite para cada par de rayos adyacentes, lo que permite identificar todas las llegadas en el receptor con sus correspondientes propiedades de tiempos de vuelo y pérdidas de transmisión, para así poder calcular la función de transferencia del canal, teniendo en cuenta si ha sufrido o no rebotes en la superficie.

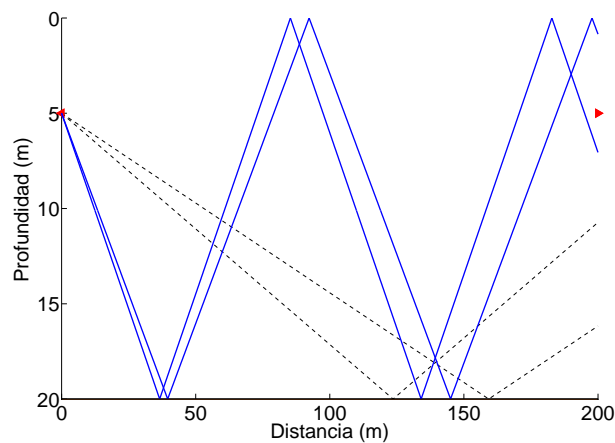


Figura 3.20: Identificación de llegadas en el receptor

### 3.6. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un estudio teórico de los distintos fenómenos que afectan a la propagación de ondas acústicas en entornos subacuáticos, con el objetivo de caracterizar este medio como un canal dinámico de transmisión de este tipo de señales. Las conclusiones más relevantes son las siguientes:

- El perfil de velocidad del sonido es un parámetro clave a considerar en la propagación acústica subacuática. Este perfil afecta de manera fundamental a la propagación curvando la señal acústica, alterando su trayectoria hacia regiones donde la velocidad del sonido presenta valores menores, generando así una propagación compleja donde a su vez se pueden formar canales particulares de propagación. Este perfil a su vez es altamente variable en el tiempo, presentando variaciones en el intervalo de un día por la acción del sol en el agua, y en intervalos estacionales, debido a la influencia del clima. Además, presenta también una gran dependencia geográfica, al variar en gran medida en función del efecto de la atmósfera.
- Existen diversos mecanismos que pueden provocar una atenuación en una señal acústica que se propaga por el medio subacuático. De todos ellos, la divergencia geométrica, la absorción y las pérdidas ocasionadas por los rebotes de la señal acústica en la superficie del mar y en el fondo marino, se han identificado como los mecanismos fundamentales de pérdidas. Este hecho se debe a que estos procesos de pérdidas van a aparecer prácticamente en cualquier propagación que se efectúe en este medio. La divergencia geométrica es especialmente relevante para distancias cortas entre emisor y receptor, ya que su ritmo de crecimiento está muy limitado por tener una dependencia logarítmica con la distancia. La atenuación por su parte es altamente dependiente de la frecuencia, aunque presenta no obstante unos valores mucho más favorables que

su equivalente para la propagación acústica en el aire. La absorción limitará el rango de funcionamiento del sistema así como la frecuencia de la señal emitida. En lo que respecta a las pérdidas de transmisión por rebotes en la superficie del mar y del fondo, se ha considerado que su inclusión en el modelo es también fundamental, puesto que aunque haya casos en que dicha interacción es despreciable, en otros (como un canal superficial), las pérdidas pueden ser significativas. Las pérdidas de transmisión por rebotes en la superficie son muy dependientes de la frecuencia de la señal y la rugosidad de la superficie, donde para los valores típicos de frecuencia de señal empleadas en este trabajo y de viento, que origina dicha rugosidad, no son despreciables.

- El efecto de la superficie del mar es más complejo que considerarlo únicamente como una fuente de pérdidas de transmisión. El efecto dinámico de ésta debido al oleaje generado por el viento provoca un proceso dinámico en las señales reflejadas en dicha superficie. Estas señales sufrirán un desvanecimiento en amplitud, cambios de fases y un ensanchamiento Doppler. Al trabajar con señales codificadas en este trabajo, se ha considerado que este efecto es lo suficientemente importante como para tenerlo en cuenta entre los fenómenos fundamentales. Hay que resaltar además que este efecto no se considera habitualmente en los modelos de trazado de rayos citados en la bibliografía.
- Se han identificado distintas fuentes de ruido en el medio, y se ha estudiado su rango de influencia en función de la frecuencia a la que presentan una componente de densidad espectral importante. Considerar un modelo de ruido que tenga en cuenta todos estos efectos es complejo debido a las incertidumbres asociadas y se escapa del objetivo de esta tesis. Considerando las frecuencias empleadas en este trabajo y en función del estudio bibliográfico realizado, se ha asumido que un modelo basado en ruido blanco Gaussiano es suficientemente representativo.
- En base a todo el estudio realizado sobre la propagación acústica y los mecanismos que la afectan, se ha desarrollado un modelo de propagación basado en trazado de rayos. Este modelo considera diversos parámetros medioambientales de entrada para representar el entorno, así como distintas configuraciones de emisor y receptor, admite cualquier señal de entrada y calcula la señal recibida teniendo en cuenta el multicamino que sufre la señal, así como la atenuación debida a los distintos procesos comentados anteriormente y el efecto dinámico del oleaje. El modelo además tiene un amplio rango de validez de frecuencias y parámetros medioambientales debido a las distintas ecuaciones implementadas y a que considera perfiles de batimetría y de velocidad del sonido, lo que permite que se pueda usar en entornos de aguas profundas y poco profundas.



## Capítulo 4

# Descripción del sistema de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento subacuáticos han adquirido una importancia creciente en los últimos años, debido a la necesidad de conocer la posición de los distintos nodos en sistemas diversos. Un ejemplo serían las redes de sensores, donde la información tomada de los distintos nodos necesita ir acompañada de una posición para que sea relevante; otro ejemplo viene dado por los sistemas de navegación en AUV o ROV, donde se requiere conocer la posición de dicho elemento para poder proseguir con su misión.

En los sistemas terrestres en exteriores el GPS es una solución comúnmente aceptada y que proporciona errores asumibles en la mayoría de aplicaciones que lo emplean. Por el contrario, en sistemas interiores se requiere otro tipo de tecnología como el posicionamiento acústico o sensores inerciales, puesto que la señal electromagnética del GPS se atenúa enormemente con las paredes de los edificios, haciendo su uso inviable.

El medio subacuático presenta una problemática similar, puesto que las señales electromagnéticas del GPS apenas pueden atravesar algunos metros la superficie del mar, lo que provoca que su uso quede prácticamente restringido para el posicionamiento de barcos o boyas en la superficie, tal y como se recogió en el capítulo 2. En dicho capítulo se mostraron además diversas alternativas de sistemas de posicionamiento subacuático basados en sistemas inerciales, sistemas de posicionamiento acústico, o por fusión de tecnologías.

Esta última variante es la que está cobrando más importancia en los últimos años, debido a que permite aprovechar las ventajas de distintas tecnologías para mejorar las prestaciones del sistema, haciéndolo más completo y robusto. Uno de los sistemas que se pueden considerar basados en fusión de tecnologías son los que usan señales GPS para posicionar diversos nodos en la superficie del mar, y posteriormente, estos nodos de posiciones ya conocidas emiten señales acústicas para localizar a otro, que se encuentra sumergido. Esta configuración resultaría en un sistema análogo al sistema de balizamiento para posicionamiento acústico en entornos terrestres como los desarrollados por Álvarez

[Álv05] o Ruiz [Rui11].

El sistema de posicionamiento propuesto en este trabajo hace uso del GPS, enlaces de radiofrecuencia y transductores acústicos, pero no considera sensores inerciales, lo que supondría elevar el coste y la complejidad del sistema. A diferencia de los sistemas de posicionamiento recogidos en la sección 2.3 que usan GPS y transductores acústicos, el sistema propuesto no está basado en la comunicación de la posición de las boyas a un nodo sumergido, como el de Youngberg [You92], ni necesita el sincronismo de todo el sistema, como el descrito por Thomas [Tho98]. Además, hace uso de señales acústicas codificadas para mejorar la estimación de los tiempos de vuelo y ganar inmunidad frente al ruido, mientras que hasta la fecha, la mayoría de sistemas que hacen uso de señales acústicas codificadas las emplean en sistemas de comunicaciones o como parte de un protocolo de acceso al medio en redes de sensores.

A continuación se describirán con más detalle las distintas etapas del diseño de este sistema de posicionamiento. Primero se mostrarán los distintos elementos que forman el sistema y su despliegue en el medio. Posteriormente se verá el proceso de medida que sigue el sistema para obtener todas las distancias entre los distintos nodos, y a continuación se describirá la etapa de codificación y proceso de la señal acústica, incluyendo además una breve descripción de los dos esquemas de codificación estudiados en este trabajo, que son los conjuntos de secuencias complementarias y las secuencias Kasami. Finalmente, se expondrán los distintos algoritmos de posicionamiento que se han contemplado en este trabajo, y se concluirá el capítulo con un resumen de las características principales del sistema.

## 4.1. Despliegue y características del sistema

El objetivo del sistema de posicionamiento subacuático propuesto es obtener en la superficie la posición de un nodo sumergido (ROV, AUV...) en un entorno subacuático cualquiera. En lo que respecta al cálculo de la posición de este nodo sumergido, el objetivo es calcular su ubicación en el plano XY. Esto es así puesto que la coordenada  $z$  del nodo, que será la profundidad, se puede obtener fácilmente con un sensor de presión, que no supone un incremento de coste determinante, enviándose esta información a la superficie. De esta manera se evita el cálculo de esta variable, que conlleva grandes errores debido a la geometría de este tipo de entornos, donde las profundidades pueden ser de un orden de magnitud diferente a la separación de las distintas balizas, originando un problema de origen geométrico e independiente de los algoritmos de posicionamiento empleados [Roa05].

De manera general, el sistema de posicionamiento propuesto en este trabajo está formado por una serie de nodos de referencia con posiciones conocidas, y uno de posición desconocida, que es el que se quiere localizar. Concretando para el medio subacuático, este nodo desconocido puede ser un ROV o un AUV que esté navegando por el entorno, mientras que los nodos de referencia de posiciones conocidas no se limitan a una configuración

determinada, puesto que los algoritmos de posicionamiento que se recogen en este trabajo solo requieren que las posiciones de los distintos nodos de referencia sea conocida. Esta posición se puede lograr mediante un GPS en el caso de boyas en la superficie, o por montaje, si se dispusieran diversos transductores en una plataforma fija asemejándose entonces a los sistemas de balizamiento existentes en aire, o a los sistemas SBL descritos en la sección 2.3, si utilizaran los desfases de la señal.

Teniendo en cuenta esta versatilidad, pero a efectos de simplificar de manera conceptual el estudio del sistema de posicionamiento propuesto, se ha escogido una configuración formada por un nodo sumergido que quiere obtener su posición y que está equipado con un transductor acústico y un sensor de presión, y un número determinado de boyas en la superficie del mar, cada una de ellas equipadas con un receptor GPS, un dispositivo de comunicaciones de radiofrecuencia y un transductor acústico sumergido.

Una o varias de las boyas también pueden ser barcos, puesto que el único requisito es que cuenten con el equipamiento mencionado anteriormente. Esto permitirá distintas versiones del sistema, que puede consistir en un barco y varias boyas que se pueden desplegar en el entorno, realizando el proceso de posicionamiento del nodo sumergido en el barco y posteriormente recoger todo. Otra posibilidad sería llevar el sistema implementado en varias boyas, donde una asumiría el papel de boya maestra, realizaría los cálculos y podría enviar los resultados mediante el enlace de comunicaciones de radiofrecuencia a una estación en tierra si ésta se encontrara lo suficientemente cerca.

El despliegue del sistema propuesto se muestra en la figura 4.1, donde se han representado una serie de boyas (en color amarillo) en la superficie del mar, que reciben una señal GPS de los satélites a los que tengan acceso (representados en color oscuro a mayor altura que las boyas). El objeto a localizar es un AUV que navega a una determinada profundidad (representado en color oscuro y forma ovalada). En la figura se han contemplado también las distintas señales que emite cada tipo de nodo del sistema, asignando un color rojizo a la señal de radiofrecuencia (RF), un tono azulado a la señal acústica y un color negro a la señal del GPS.

El utilizar GPS en los nodos superficiales simplifica enormemente la calibración del sistema y su despliegue, puesto que de esta manera se obtiene la posición de todos ellos de manera sencilla y se evitan los procesos de calibración de los sistemas LBL, que son complejos y costosos, así como la necesidad de tener un barco siguiendo al nodo sumergido, como ocurre en los sistemas SBL o USBL. La tecnología GPS está ampliamente extendida en la actualidad, de manera que su coste económico e integración con otros dispositivos es totalmente factible, a diferencia de otros sistemas como los sensores inerciales, en los que el coste económico es considerablemente mayor.

La estimación de la posición del nodo sumergido se logrará gracias a la emisión y recepción de señales acústicas, siguiendo un procedimiento de medida determinado que se explicará posteriormente. El uso de señales acústicas es la forma más versátil para transmitir

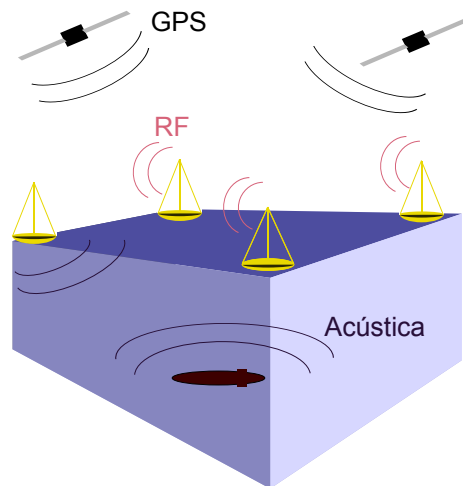


Figura 4.1: Despliegue del sistema de posicionamiento subacuático propuesto

información en el medio subacuático sin restringirse a distancias muy cortas (del orden de metros o decenas de metros), en las que se podrían emplear otras tecnologías como las señales electromagnéticas. De esta forma, el sistema puede tener un área de cobertura considerablemente mayor.

Debido a las adversas condiciones del medio y con el objetivo de obtener la distancia entre dos nodos con mayor precisión, las señales acústicas del sistema propuesto se codifican mediante técnicas CDMA. Ésta es una solución que se ha empleado con bastante asiduidad en posicionamiento acústico en entornos terrestres [Álv05, Mar06, Pér09], pero en lo que respecta al medio subacuático las señales acústicas codificadas se han empleado fundamentalmente en sistemas sódar y de comunicaciones, así como en redes de sensores. El empleo de técnicas CDMA en sistemas de posicionamiento subacuático es por tanto un campo a explorar y que puede aportar diversas ventajas:

- Aumentan la ganancia de proceso al poderse detectar las señales en presencia de mayor nivel de ruido.
- Permiten estimar los tiempos de vuelo de las señales con mayor precisión mediante el uso del filtro acoplado.
- Se pueden utilizar en sistemas de múltiples usuarios, lo que permitirá que en un nodo se puedan recibir varias señales a la vez, y sean distinguibles.

Mediante el uso de señales acústicas codificadas y un proceso de medida adecuado, es posible obtener en uno de los nodos superficiales, que será el que inicie el proceso de medida (y que se denominará nodo maestro a partir de ahora), todas las distancias entre cada uno de estos nodos superficiales y el sumergido. Por otro lado, gracias al GPS y al enlace de radiofrecuencia se conocen también todas las distancias entre los nodos superficiales,



así como su posición. Se asume, por tanto, que el enlace de comunicaciones de radiofrecuencia tiene cobertura suficiente para cubrir a todos los nodos superficiales. Una vez que se conocen estos datos, se pueden aplicar un algoritmo de posicionamiento para obtener en el nodo maestro la posición del nodo sumergido.

#### 4.1.1. Proceso de medida del sistema de posicionamiento

En esta sección se repasará el proceso de medida que sigue el sistema de posicionamiento para obtener todas las distancias entre los distintos nodos que componen el sistema. Tanto el nodo maestro como el sumergido almacenan en una memoria los códigos que emplearán ambos, mientras que el resto de nodos superficiales solo necesitan conocer el código del nodo sumergido. El nodo maestro inicia el proceso de emisión transmitiendo su código al medio en un instante determinado, que es conocido por el resto de nodos superficiales gracias a la tecnología PPS (*Pulse Per Second*) incorporada en los receptores GPS. En este momento, todos los nodos superficiales comienzan el proceso de escucha a través del transductor acústico, iniciando así su origen de tiempo.

El código emitido por el nodo maestro llegará al nodo sumergido al cabo de un cierto tiempo, tras propagarse la señal acústica por el medio subacuático. Este nodo sumergido se encuentra siempre escuchando, y cuando detecta el código emitido por el nodo maestro responde con su propio código, que se asume llegará a todos los nodos superficiales. Cuando estos detectan el código del nodo sumergido calculan su tiempo de vuelo y le transmiten esta información y su propia posición obtenida por el GPS al nodo maestro, mediante el enlace de radiofrecuencia. Las detecciones de los códigos se realizan mediante un filtro acoplado, tal y como se explicará con más detalle en la sección 4.2.

Si se considera un sistema formado por  $S$  nodos, con  $S-1$  nodos superficiales y un nodo sumergido, y se denomina  $d_{ij}$  a las distintas distancias entre todos los nodos, asignando por comodidad el índice 1 para el nodo maestro y el índice  $S$  para el nodo sumergido, se puede formar una matriz de distancias  $\mathbf{D}$  que recoja todas estas medidas en el nodo maestro, dada por

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1S} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{S1} & d_{S2} & \dots & d_{SS} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

donde los elementos de la diagonal son nulos al representar la distancia consigo mismos, y se asume que  $d_{ij} = d_{ji}$ . De esta manera, la distancia entre el nodo maestro y el nodo sumergido se puede calcular como

$$d_{1S} = \frac{t_{1S} - t_p}{2} \cdot c \quad (4.2)$$

donde  $t_{1S}$  es el tiempo de ida y vuelta medido en el nodo maestro entre la emisión de su

código y la recepción del código del nodo sumergido,  $c$  es la velocidad del sonido en el agua y  $t_p$  es el tiempo de proceso que conlleva la detección de estas señales. Hay que tener en cuenta que en los resultados este tiempo de proceso se supone conocido y constante mediante un proceso de caracterización. Por otra parte, las distancias entre cada nodo superficial y el nodo sumergido,  $d_{iS}$ , con  $i \neq 1$ , se pueden calcular como

$$d_{iS} = (t_{iS} - t_p) \cdot c - d_{1S} \quad (4.3)$$

siendo  $t_{iS}$  el tiempo de vuelo medido en el nodo superficial  $i$ , con  $i \neq 1$ , entre la emisión del código del nodo maestro (instante que es conocido por el PPS del GPS) y la recepción en dicho nodo del código del nodo sumergido. Los tiempos de vuelo  $t_{iS}$  se envían al nodo maestro mediante el enlace de radiofrecuencia, así como la posición del nodo  $i$ , obtenida por el GPS, lo que permitirá al nodo maestro calcular las distancias entre los nodos superficiales  $d_{ij}$ , con  $i, j \neq S$  de manera directa. Una vez que se conocen todas las distancias  $d_{ij}$  y las posiciones de los nodos superficiales, se pueden aplicar los algoritmos de posicionamiento para localizar al nodo sumergido.

Este proceso de medida se ilustra en la figura 4.2, donde se han representado las señales emitidas en bloques de línea continua, y las recibidas en líneas discontinuas, así como los tiempos medidos en cada caso. El código emitido por el nodo maestro se ha denominado  $C_1$ , y el emitido por el nodo sumergido  $C_S$ . Por simplificar el diagrama, se han considerado tres nodos superficiales, incluido el maestro.

Este esquema de medida de distancias presenta la ventaja de que únicamente son necesarios dos códigos diferentes y dos emisiones al medio. Además, la extensión a la localización de nodos sumergidos adicionales es inmediata, puesto que solamente se necesita asignarle un código diferente y que este código esté almacenado en la memoria de todos los nodos superficiales, para que puedan calcular así su tiempo de vuelo. Únicamente sería necesaria una emisión al medio adicional por cada nodo sumergido que se introduzca al sistema, donde esta emisión sería la transmisión de su propio código. De esta manera, en el nodo maestro se podría obtener la localización simultánea de diversos nodos sumergidos que estén navegando en el entorno, sin que el sistema aumente su complejidad.

## 4.2. Codificación de la señal acústica

La incorporación a los sistemas sónar y sistemas de posicionamiento de las técnicas de codificación y procesado de la señal acústica empleadas en el radar supuso un avance considerable en el desarrollo de estos sistemas, tal y como se reflejó en la sección 2.2. Estos avances tienen que ver principalmente con la precisión temporal, la resolución espacial y la relación señal-ruido, por lo que resultan especialmente interesante en entornos ruidosos y donde se quiere conseguir una buena precisión temporal. Otra ventaja asociada a la codificación de la señal es la posibilidad de realizar emisiones simultáneas sin que se

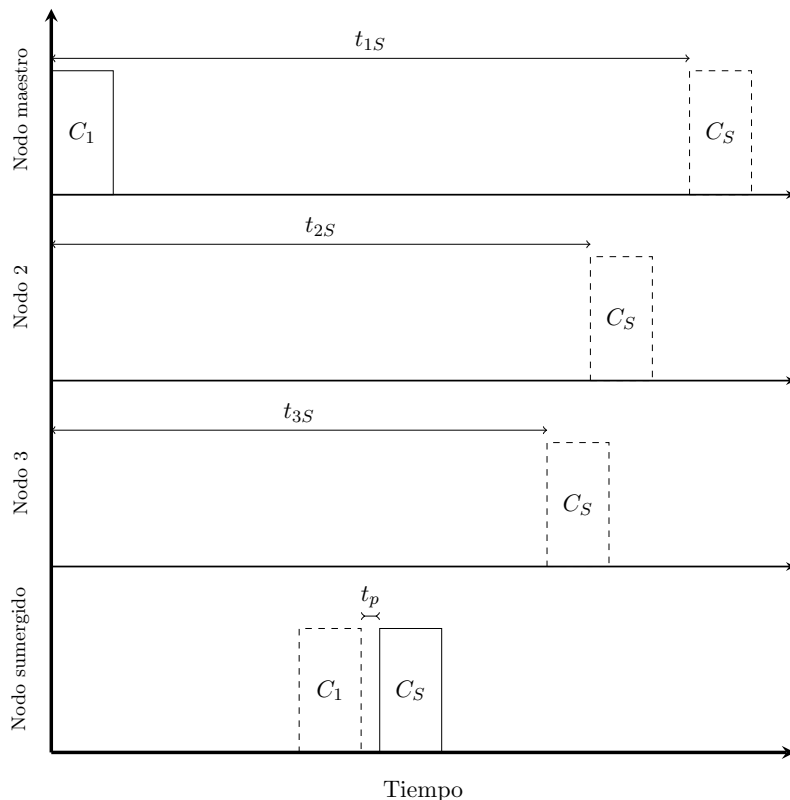


Figura 4.2: Diagrama que representa la obtención de los tiempos de vuelo en los distintos nodos del sistema

produzcan interferencias entre ellas, lo que permite aumentar la frecuencia de operación del sistema y aporta robustez cuando las condiciones de medida cambien rápidamente, como es el caso de robots que se están moviendo en un determinado entorno.

A lo largo de las últimas décadas se han propuesto numerosos esquemas de codificación, y un estudio completo de todos ellos se sale del objetivo de esta tesis. Dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá ya se han realizado trabajos comparando las propiedades de diferentes códigos, como el de Pérez [Pér09].

En esta tesis el interés se ha centrado en dos esquemas de codificación que proporcionan buenas propiedades de correlación cruzada, autocorrelación, y que proporcionan una familia amplia de códigos ortogonales entre sí para distintas secuencias en lo que respecta a una detección asíncrona, como son los conjuntos de secuencias complementarias y las secuencias Kasami. Estos esquemas suponen una propuesta novedosa en entornos subacuáticos donde la mayoría de sistemas que hacen uso de señales codificadas utilizan familias de códigos como las secuencias Gold, Barker o secuencias-m, cuyas propiedades teóricas son peores respecto a las anteriores familias de códigos. Los dos esquemas de codificación considerados en esta tesis se detallarán más adelante en esta sección, mientras que una comparativa de sus prestaciones en entornos subacuáticos se recoge en el capítulo 5.

El bloque central de un sistema de detección basado en compresión de pulsos es el filtro acoplado, que es el sistema lineal óptimo para detectar la presencia de una forma de onda conocida en un ambiente ruidoso, puesto que maximiza la relación señal-ruido a la salida en el instante en que esta forma de onda es recibida. Asumiendo que el ruido presente en el medio es ruido blanco aditivo Gaussiano, la función de transferencia del filtro acoplado a una señal  $s(t)$  de duración  $T_s$  viene dada por [PS02]

$$H(\omega) = S^*(\omega)e^{-j2\pi fT_s} \quad (4.4)$$

donde  $S(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $s(t)$  y el operador  $*$  representa conjugación compleja. En este caso la relación señal-ruido óptima que se obtiene a la salida del filtro únicamente depende de la densidad espectral de potencia del ruido de entrada y de la energía de la señal transmitida, pero no de las características de esta señal. En el caso de señales discretas en el tiempo, la ecuación (4.4) queda

$$H(e^{j\omega}) = S^*(e^{j\omega})e^{-j\omega(N-1)} \quad (4.5)$$

donde ahora  $S(e^{j\omega})$  representa la transformada de Fourier en tiempo discreto (*Discrete-time Fourier transform*, DTFT) de la secuencia patrón  $s[n]$ ,  $N$  es el número de muestras de esta secuencia, y  $H(e^{j\omega})$  es la función de transferencia del correspondiente filtro acoplado digital. Si se aplica la transformada inversa de Fourier a la ecuación (4.5) se obtiene la respuesta impulsiva del filtro, dada por

$$h[n] = s[(N-1) - n] \quad (4.6)$$

que no es más que una versión retardada ( $N-1$ ) muestras de la imagen especular de la secuencia  $s[n]$  a la que el filtro está acoplado. La respuesta del filtro a una secuencia de entrada  $r[n]$  puede obtenerse a partir de (4.7):

$$y[n] = h[n] * r[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r[k] \cdot h[n-k] \quad (4.7)$$

siendo  $*$  el operador de convolución discreta. Sustituyendo (4.6) en (4.7), se llega a

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r[k] \cdot s[(N-1) - (n-k)] = \sum_{k=0}^{N-1} r[n - (N-1) + k] \cdot s[k] \quad (4.8)$$

donde se ha supuesto que la secuencia patrón está definida de modo que  $s[k] \neq 0$  para  $0 \leq k \leq N-1$ . Esta última expresión indica que en la práctica, un filtro acoplado para señales discretas en el tiempo puede ser implementado como un correlador digital que de manera continua correla las  $N$  últimas muestras adquiridas con las  $N$  muestras de la secuencia patrón, tal y como se muestra en la figura 4.3.

La ecuación (4.8) representa la función de autocorrelación de la señal emitida. La forma de esta función, y no la duración de los pulsos emitidos, es lo que determina la resolución

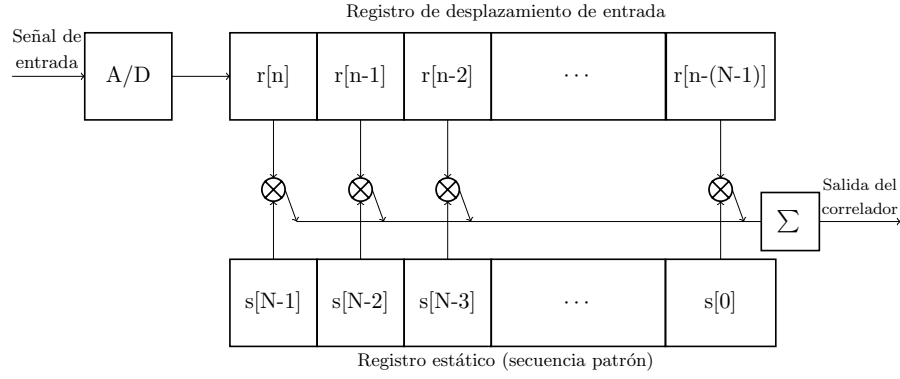


Figura 4.3: Implementación de un filtro acoplado como un correlador digital

espacial en este tipo de sistemas. Si se escoge de manera adecuada la señal patrón, se puede obtener la resolución espacial asociada a un pulso de corta duración (que presenta mayor resolución), manteniendo la relación señal-ruido que proporcionan los pulsos de larga duración.

Para obtener una buena resolución espacial, la función de autocorrelación debe cumplir que su lóbulo principal sea lo más estrecho posible, mientras que el nivel de los lóbulos laterales debe ser lo más bajo posible, minimizando así la influencia del multicamino o de obstáculos cercanos. Existen varias alternativas a la hora de definir una señal patrón con las propiedades de autocorrelación descritas [Mah00], pero el método empleado de manera habitual consiste en la modulación en fase de un código binario cuya función de autocorrelación tiene estas propiedades.

Adicionalmente, hay que tener en cuenta también que la posibilidad de realizar emisiones simultáneas viene dada por la existencia de una familia de códigos cuya correlación cruzada entre dos de ellos cualesquiera se mantiene en un valor considerablemente inferior al del pico principal de la función de autocorrelación.

Un criterio ampliamente utilizado para evaluar las bondades de una familia de  $M$  códigos es calcular su cota máxima de correlación ( $\chi$ ), también conocida por su término en inglés, *bound*. Para emisiones aperiódicas, esta cota máxima de correlación viene dada por [Pér09]:

$$\chi = \max \{ \theta_{AC}, \theta_{CC} \} \quad (4.9)$$

En la ecuación (4.9) el término  $\theta_{AC}$  representa el valor del máximo pico lateral obtenido de entre todas las autocorrelaciones de los  $M$  códigos de la familia, y  $\theta_{CC}$  es el mayor valor de correlación cruzada entre ellas, es decir

$$\theta_{AC} = \max \left\{ \frac{|\phi_{x_i x_i}[k]|}{\phi_{x_i x_i}[0]} ; \forall i \in [0, \dots, M-1]; \forall k \neq 0 \right\} \quad (4.10)$$

$$\theta_{CC} = \max \left\{ \frac{|\phi_{x_i x_j}[k]|}{\phi_{x_i x_i}[0]} ; \forall i, j \in [0, \dots, M-1]; i \neq j; \forall k \right\} \quad (4.11)$$

donde  $\phi_{x_i x_j}$  hace referencia a la correlación aperiódica de dos secuencias  $x_i$  y  $x_j$ . Este criterio será el elegido para escoger los códigos a utilizar dentro de una misma familia, buscando siempre un valor de cota máxima de correlación lo más pequeño posible para un conjunto de secuencias determinado.

A continuación se realiza una breve descripción de los dos esquemas de codificación empleados en los estudios realizados en esta tesis, que son los conjuntos de secuencias complementarias y las secuencias Kasami. Para una descripción más detallada se aconseja consultar [Álv05, Mar06, Pér09].

#### 4.2.1. Conjuntos de secuencias complementarias

Los conjuntos de secuencias complementarias son una generalización de las parejas Golay, donde éstas aparecen por primera vez en los trabajos del suizo Marcel Golay a mediados del siglo XX en problemas relacionados con la espectrometría infrarroja, y posteriormente sugiriendo su uso para los sistemas de comunicaciones [Gol49, Gol51, Gol61].

Dos secuencias binarias  $a[n]$  y  $b[n]$  de igual longitud  $L$ , constituyen una pareja Golay si la suma de sus funciones de autocorrelación aperiódica,  $\phi_{xx}$ , proporciona una delta de Kronecker de valor  $2L$ , es decir

$$\phi_{aa}[n] + \phi_{bb}[n] = 2L \cdot \delta[n] \quad (4.12)$$

Además de contar con una autocorrelación ideal, es posible encontrar parejas Golay con buenas propiedades de autocorrelación cruzada. En estos casos, al sumar las correlaciones entre las correspondientes secuencias de cada par, se obtiene un valor pequeño en relación al pico que se obtiene en la suma de autocorrelaciones. Siendo  $(a, b)$  y  $(c, d)$  dos parejas cualesquiera con esta propiedad, se tiene que

$$\phi_{ac}[n] + \phi_{bd}[n] \ll 2L \quad (4.13)$$

La longitud  $L$  de estas parejas Golay viene dada por  $L = 2^a \cdot 10^b \cdot 26^c$ , siendo  $a$ ,  $b$  y  $c$  números enteros positivos [Pér09]. Estas parejas se pueden obtener combinando un conjunto de operaciones de simetría con varios métodos de generación recursivos sobre cinco parejas primitivas [Álv05].

Tseng y Liu realizaron la generalización de las parejas Golay en 1972 como resultado de su investigación relacionada con dispositivos de ondas acústicas superficiales [TL72], obteniendo los conjuntos de secuencias complementarias (*Complementary Sets of Sequences*, CSS). En este caso, un conjunto de  $p$  secuencias binarias  $x_i[n]$ , donde  $1 \leq i \leq p$ , cuyos elementos pueden tomar el valor 1 o -1, se dice que constituyen un conjunto de secuencias complementarias cuando la suma de sus secuencias de autocorrelación aperiódica es nula para cualquier desplazamiento distinto de cero:

$$\phi_{x_1 x_1}[n] + \phi_{x_2 x_2}[n] + \dots + \phi_{x_p x_p}[n] = 0 \quad \forall n \neq 0 \quad (4.14)$$

En este caso, la función de autocorrelación periódica tiene un máximo de valor  $M \cdot L$ , siendo  $M$  el número de secuencias del conjunto, donde  $M = 2^m$  con  $m \in \mathbb{N} - 0$ , y  $L$  la longitud de las secuencias, donde  $L = M^N$ , con  $N \in \mathbb{N} - 0$ . El eliminar la restricción del número de secuencias que forman cada conjunto favorece la aparición de propiedades con interesantes aplicaciones prácticas. Por un lado, la longitud de las secuencias que forman un conjunto no está tan limitada como en el caso de las parejas Golay, pudiéndose generar también conjuntos con secuencias de distinta longitud siempre que el número de secuencias con la misma longitud dentro del conjunto sea par. Por otro lado, el número de conjuntos de secuencias mutuamente ortogonales que puede obtenerse es mayor. Para este caso, si se consideran dos conjuntos diferentes de secuencias complementarias formado por  $M$  secuencias denotadas por  $S'_{i,M}[k]$  y  $S''_{i,M}[k]$ , donde  $1 \leq i \leq M$ , la suma de las funciones de correlación cruzada entre las correspondientes secuencias de ambos conjuntos viene dada por:

$$\phi_{S'_{1,M}S''_{1,M}}[k] + \phi_{S'_{2,M}S''_{2,M}}[k] + \dots + \phi_{S'_{M,M}S''_{M,M}}[k] = 0 \quad \forall k \quad (4.15)$$

donde  $\phi_{S'_{i,M}S''_{i,M}}[k]$  es la función de correlación cruzada entre las correspondientes secuencias de ambos conjuntos, que se define como

$$\phi_{S'_{i,M}S''_{i,M}}[k] = \sum_{j=1}^L S'_{i,M}[j] \cdot S''_{i,M}[j+k] \quad (4.16)$$

La figura 4.4 muestra la función de autocorrelación para un conjunto de 4 secuencias complementarias de longitud 16, mientras que la figura 4.5 representa la función de correlación cruzada entre dos conjuntos diferentes de 4 secuencias de longitud 16, ortogonales entre sí. En estas figuras se pueden apreciar las propiedades descritas anteriormente. En la función de autocorrelación se tiene un máximo de valor 64, equivalente a  $4 \cdot 16$ , mientras que el valor de la función de correlación cruzada es nulo.

De la misma manera que con las parejas Golay, los conjuntos de secuencias complementarias se generan aplicando una serie de métodos recursivos sobre conjuntos ya conocidos. De Marziani describe el proceso de generación de un conjunto complementario de  $M$  secuencias mutuamente ortogonales en [Mar06].

Estas secuencias deben ser transmitidas al medio, y de forma general, aumentar el número de secuencias tiene la contrapartida de incrementar también la complejidad del proceso en la detección. Un método de emisión que no incrementa la complejidad de los sistemas de detección y tampoco presenta grandes demandas de ancho de banda, consiste en la transmisión de las secuencias que componen el conjunto siguiendo un determinado orden, lo que permite utilizar una modulación bifásica (*Binary Phase-Shift Keying*, BPSK) para transmitir cada bit. En la recepción, se realizaría la suma de los resultados obtenidos teniendo en cuenta el orden de emisión establecido. Otro método de emisión análogo consiste en el entrelazado de los bits que componen las secuencias del conjunto.

En ambos casos se obtiene una nueva secuencia, que se denominará macro-secuencia,

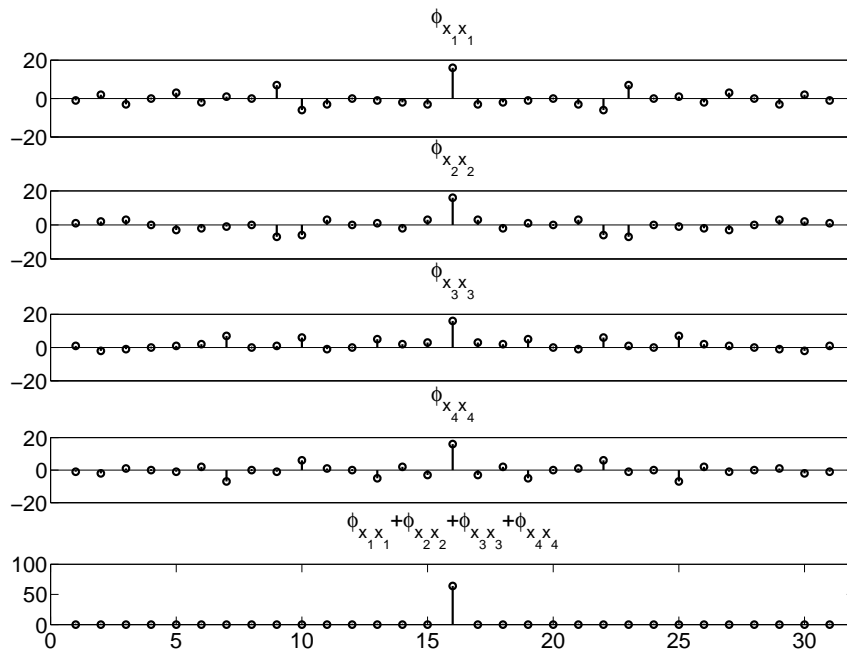


Figura 4.4: Función de autocorrelación para un conjunto de secuencias complementarias

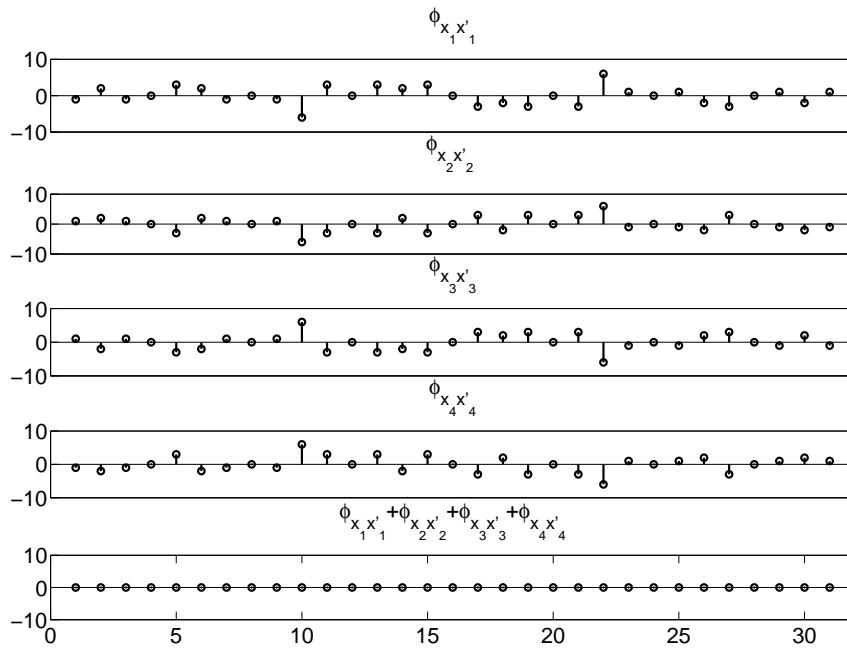


Figura 4.5: Función de correlación cruzada entre dos conjuntos de secuencias complementarias ortogonales



de longitud  $M \cdot L$ , siendo  $M$  el número de secuencias del conjunto y  $L$  la longitud de las secuencias, y cuyas propiedades se han degradado respecto a las secuencias originales. Esto se debe a que la propiedad de complementariedad del conjunto utilizado para formar esta macro-secuencia no puede ser aprovechada en todos los desfases considerados en la correlación, debido a que las secuencias no se están emitiendo simultáneamente. De esta manera, si se evalúan las propiedades de las funciones de correlación de las macro-secuencias, se pueden seleccionar grupos de ellas, denominadas secuencias preferidas, que presentan la mínima interferencia, siendo las más adecuadas para utilizarse en sistemas de múltiples nodos.

La figura 4.6 (a) muestra la función de autocorrelación para una macrosecuencia CSS (M-CSS) de longitud 64 creada mediante el entrelazado de bits, mientras que en la figura 4.6 (b) se puede observar la correlación cruzada entre dos macrosecuencias preferidas de longitud 64. Si se comparan estos resultados con los de las figuras 4.4 y 4.5, se observa cómo se han degradado las propiedades de autocorrelación y correlación cruzada al formarse la macrosecuencia.

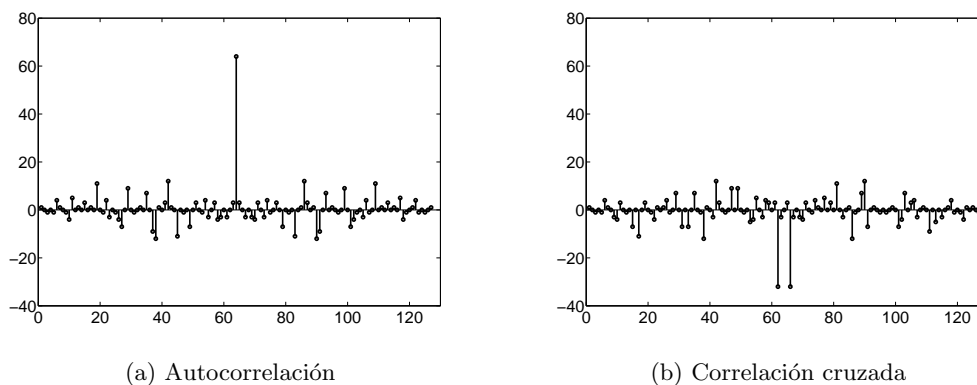


Figura 4.6: Autocorrelación y correlación cruzada de una M-CSS de longitud 64

Una correcta elección de estas macrosecuencias permitirá reducir el efecto de la interferencia entre-símbolos (*Inter-Symbol Interference*, ISI), ocasionada por el multicamino y por el hecho de que los lóbulos laterales de la función de autocorrelación no sean nulos. Adicionalmente, también permitirá reducir los efectos de la interferencia por acceso múltiple (*Multiple Access Interference*, MAI), debido a que la propiedad de ortogonalidad de estas macrosecuencias se ha degradado y, por tanto, existirá cierta interferencia cuando estos códigos se superpongan en un receptor. Estas macrosecuencias preferidas fueron evaluadas por De Marziani en [Mar06], utilizándose sus resultados en este trabajo. Para ello se elegirán siempre los conjuntos de secuencias que proporcionan mejores resultados en cuanto a los valores de su cota máxima de correlación para minimizar así los efectos de ISI y MAI.

### 4.2.2. Secuencias Kasami

Las secuencias Kasami [Kas68] son un tipo de secuencias pseudo-aleatorias, al igual que los códigos Gold [Gol67a] y las secuencias-m [Gol67b]. Por secuencias pseudo-aleatorias se conoce a todas aquellas secuencias binarias que presentan un comportamiento similar al de una secuencia totalmente aleatoria, a pesar de que son generadas de manera determinista. Estas secuencias deben cumplir los siguientes criterios [Pér09]:

- La función de autocorrelación periódica en cualquier instante  $\tau \neq 0$  debe ser una constante de bajo valor.
- En cada periodo, el número de elementos igual a 1 no debe exceder en más de una unidad al número de elementos igual a  $-1$ .
- En cada periodo, la mitad de los 1 o  $-1$  consecutivos tienen longitud 1, un cuarto tiene longitud 2, un octavo longitud 3, etc. Además, hay el mismo número de 1 consecutivos que de  $-1$ .

Muchas de estas secuencias se generan gracias a una estructura denominada registro de desplazamiento realimentado (*Feedback Shift Register*, FSR), cuya implementación en hardware digital es relativamente sencilla. Un FSR se constituye de dos bloques: un registro de desplazamiento y una función de realimentación que genera el bit de mayor peso. A cada impulso de una señal de reloj, todos los bits del registro se desplazan una posición a la derecha, y el nuevo bit de mayor peso se genera a partir del valor de los bits del registro mediante la función de realimentación. Si esta función de realimentación consiste en realizar la operación XOR con bits específicos del registro de desplazamiento, se dice que el FSR es lineal (LFSR).

Las secuencias generadas con un LFSR de  $N$  bits pueden alcanzar un periodo máximo de  $2^N - 1$  bits sin que se repita el patrón. Las secuencias que tienen esta longitud máxima se denominan secuencias-m, y se generan únicamente para determinadas combinaciones de los coeficientes de realimentación. Estas secuencias poseen buenas características, cumpliendo las tres condiciones mencionadas anteriormente, y no existe límite en cuanto a su longitud, que viene dada por cualquier valor  $L = 2^N - 1$ . Sin embargo, la función de correlación cruzada entre dos secuencias-m generadas a partir de distintos LFSR proporciona resultados muy pobres, de manera general. No obstante, para determinadas longitudes existen parejas de secuencias con buenas propiedades de correlación cruzada, que se denominan parejas preferidas [Pér09]. Se pueden formar conjuntos preferidos, en donde todas las parejas que se pueden establecer de secuencias-m son preferidas, pero el número de estas secuencias que componen el conjunto es muy reducido, dificultando así su uso en entornos multi-usuario.

Por su parte, los códigos Gold que se generan a partir de parejas preferidas proporcionan un mayor número de secuencias con correlaciones cruzadas más bajas que las que se obtienen usando parejas preferidas de secuencias-m, aunque los valores de la función de

autocorrelación empeoran. En lo que respecta a la función de correlación cruzada, presentan valores similares a los obtenidos empleando secuencias-m.

Las secuencias Kasami se forman a partir de secuencias-m, y en función del número de secuencias que componen un conjunto Kasami se habla de conjunto pequeño o conjunto grande de secuencias Kasami, donde sus propiedades de correlación son diferentes. Como la única ventaja del conjunto grande de secuencias Kasami es su elevado número de secuencias, mientras que no mejora los valores de la función de correlación cruzada respecto a las secuencias-m y Gold, en este trabajo se hará uso del conjunto pequeño de secuencias Kasami.

El conjunto pequeño de secuencias Kasami mejora los valores de la función de correlación cruzada de las secuencias Gold, aunque tiene un menor número de secuencias disponibles en un conjunto. Para generarlo se parte de una secuencia-m  $m_1$  de longitud  $L = 2^N - 1$  obtenida a partir de un LFSR con un número par de celdas de memoria, es decir, donde  $\text{mod}(N, 2) = 0$ . Una segunda secuencia de periodo  $2^{N/2} - 1$  se genera a partir de diezmar la secuencia  $m_1$  por un factor  $q = 2^{N/2} + 1$ . Al concatenar  $q$  veces la secuencia diezmada se obtiene una nueva secuencia  $m_2$  de longitud  $L = 2^N - 1$ . El conjunto pequeño de secuencias Kasami está formado por  $m_1$  y la suma módulo-2 de  $m_1$  con cualquier versión desfasada de  $m_2$ , es decir

$$Kasami = \left\{ m_1, m_1 \oplus m_2, m_1 \oplus Dm_2, m_1 \oplus D^2m_2, \dots, m_1 \oplus D^{L'-1}m_2 \right\} \quad (4.17)$$

donde  $L' = 2^{N/2} - 1$  representa la longitud de la secuencia  $m_1$  diezmada por el factor  $q$ . Por lo tanto, el conjunto pequeño de secuencias Kasami tiene  $2^{N/2}$  secuencias frente a las  $2^N + 1$  que forman un conjunto Gold. Las funciones de autocorrelación y de correlación cruzada periódicas de estas secuencias toman valores en el rango:

$$R_{k_1 k_2}[\tau] = \begin{cases} L, & \tau = 0, \quad k_1 = k_2 \\ \{-1, -s(N), s(N) - 2\}, & \tau \neq 0, \quad k_1 = k_2 \\ \{-1, -s(N), s(N) - 2\}, & \forall \tau, \quad k_1 \neq k_2 \end{cases}$$

En donde  $s(N) = 1 + 2^{N/2}$ . Los valores de correlación cruzada del conjunto pequeño de secuencias Kasami son del orden de la mitad de los obtenidos con las secuencias Gold, presentando además un mejor comportamiento en sistemas asíncronos. No obstante, no son balanceadas, siendo la diferencia máxima de unos y menos unos igual a  $2^{N/2}$ .

De la misma manera que con los conjuntos de secuencias complementarias, se puede buscar entre todos los conjuntos de secuencias Kasami aquellas que proporcionan los mejores resultados atendiendo a las cotas de correlación. Pérez realizó esta búsqueda calculando las cotas mínimas de correlación aperiódica obtenidas para grupos de  $\mu$  secuencias Kasami simultáneas de longitud  $L$  [Pér09]. En este trabajo se hace uso de estos resultados para seleccionar las secuencias Kasami óptimas para emitir por el sistema.

La figura 4.7, representa un ejemplo obtenido con un código Kasami, donde en (a) se ha representado la autocorrelación para una secuencia Kasami de longitud 63, y en 4.7 (b) la

correlación cruzada entre dos secuencias Kasami de longitud 63, perteneciendo ambas a un conjunto de secuencias Kasami preferidas.

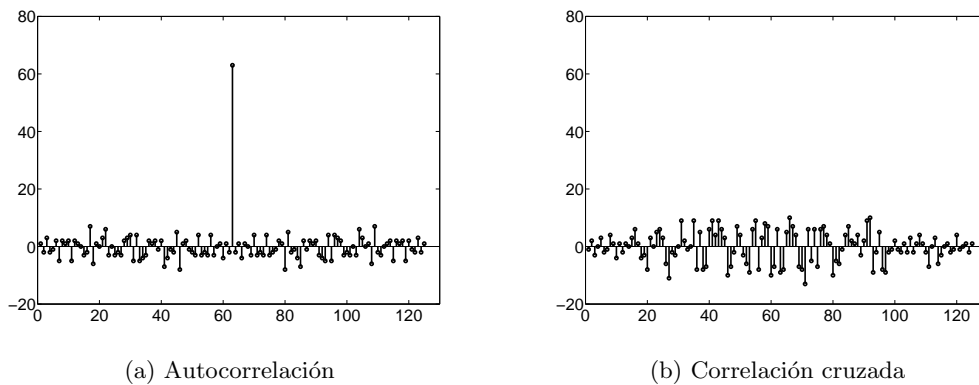


Figura 4.7: Autocorrelación y correlación cruzada para secuencias Kasami preferidas de longitud 63

### 4.3. Adaptación de la señal codificada

Una vez descritos los esquemas de codificación considerados en este trabajo, que nos proporcionarán la señal a emitir en banda base, el siguiente paso es la adaptación de estos códigos para ser emitidos al medio por el transductor ultrasónico. Las características del transductor, particularmente su frecuencia y ancho de banda, determinarán la frecuencia de la señal portadora y el número de ciclos por símbolo de modulación que se emplearán en este proceso.

Un ejemplo de respuesta en frecuencia para un traductor ultrasónico actuando como emisor se representa en la figura 4.8. Esta curva representa un sistema cuya máxima respuesta en frecuencia se sitúa en torno a los 27 kHz, con un ancho de banda (medido a -3 dB) de unos 20 kHz. Por lo tanto, lo ideal es emitir el código a una frecuencia cercana a la que proporciona la máxima respuesta del transductor, de manera que esta emisión sea más eficiente, y con un ancho de banda que esté dentro de los límites del transductor.

Hay que tener en cuenta también que el comportamiento de un transductor puede variar en función de la dirección de emisión. Si se desea conocer este comportamiento en otra dirección es necesario considerar el patrón de emisión característico del emisor. De manera general, la respuesta de la figura 4.8, que suele ser suministrada en las hojas de características del transductor, hace referencia al eje acústico de este.

Para emitir el código a la frecuencia deseada hay que aplicar un proceso de modulación a la secuencia binaria. Existen diversas alternativas de modulación, siendo las principales la modulación en amplitud, la modulación en frecuencia, y la modulación en fase. Teniendo en cuenta que la emisión de los códigos se va a realizar en entornos subacuáticos, donde la señal sufre de procesos severos de desvanecimiento, multicamino y ensanchamiento Doppler, las

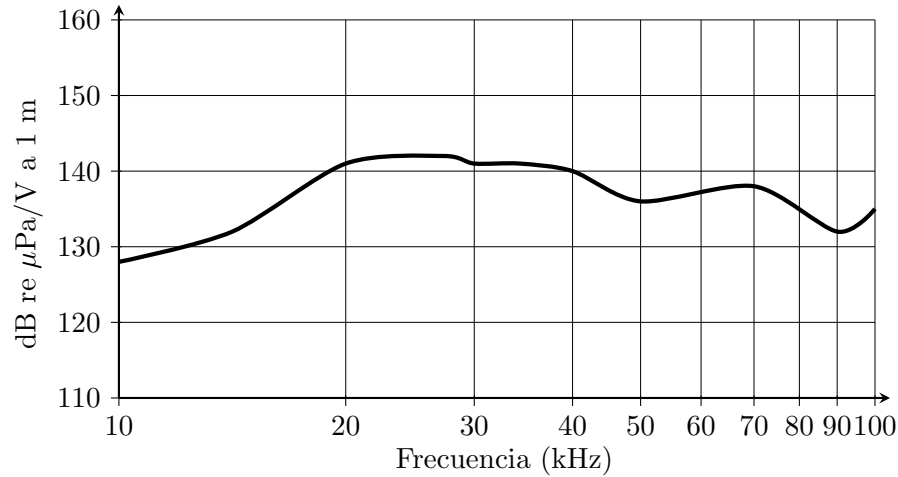


Figura 4.8: Respuesta tipo en transmisión de un transductor ultrasónico

modulaciones en amplitud y frecuencia resultan un método poco adecuado para transmitir estos códigos, puesto que son más sensibles a estos efectos, al estar la información contenida en la amplitud y la frecuencia de la señal, respectivamente. Por lo tanto, atendiendo a estas razones y a los trabajos ya revisados en el estado del arte en la sección 2.2, se ha considerado que la modulación en fase es el método más indicado para transmitir las señales codificadas en este tipo de medio.

Existen diversos esquemas de modulación en fase, tales como la modulación en fase binaria (BPSK, *Binary Phase-Shift Keying*), modulación en fase en cuadratura (*Quadrature Phase-Shift Keying*) o modulación por desplazamiento de fase de ocho símbolos (*8 Phase-Shift Keying*), por citar algunos. De todas ellas, la modulación BPSK es la que mantiene el espectro más estrecho en torno a la frecuencia de portadora cuando se utilizan símbolos de igual duración, y por tanto, ha sido la escogida para el sistema de compresión de pulsos utilizado.

La modulación BPSK es habitual en lo que respecta a la transmisión de códigos binarios en sistemas s3onar de compresión de pulsos [HPvC93, Ure98]. En este esquema de modulación, cada bit del c3odigo se modula con un s3imbolo formado por uno o varios ciclos de una portadora cuya fase ( $0$  3u  $\pi$ ) viene determinada por el valor del bit. As3i, si  $X = [x_0, x_1, \dots, x_{L-1}]$  es un c3odigo binario de  $L$  bits, donde  $x_i = \pm 1$ , y  $s(t)$ , con  $0 \leq t < M \cdot T_p$  es un s3imbolo formado por  $M$  ciclos de una portadora de frecuencia  $f_p = 1/T_p$ , la se3al modulada BPSK se puede expresar como

$$m(t) = s(t) * \sum_{i=0}^{L-1} x[i] \cdot \delta(t - i \cdot M \cdot T_p) = \sum_{i=0}^{L-1} x[i] \cdot s(t - i \cdot M \cdot T_p) \quad (4.18)$$

donde  $0 \leq t < (L - 1) \cdot M \cdot T_p$ . El n3umero de ciclos de la portadora repercute en el espectro de la se3al que es transmitida al medio. La figura 4.9 muestra el espectro de un c3odigo Kasami de 63 bits modulado a 30 kHz, con (a) un ciclo de portadora, (b) dos ciclos, (c) tres

ciclos y (d) cuatro ciclos. Se puede observar cómo al aumentar el número de ciclos el ancho de banda se reduce, desde los aproximadamente 40 kHz que presenta la señal modulada con un ciclo, hasta unos 10 kHz cuando la señal es modulada con cuatro ciclos.

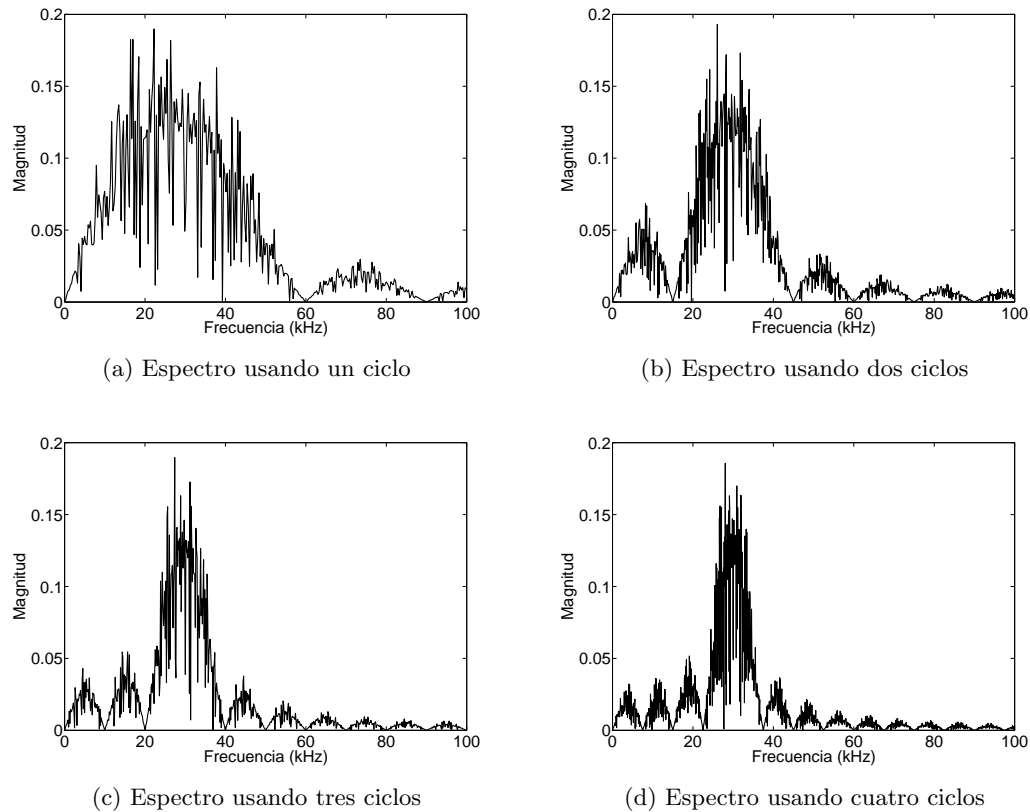


Figura 4.9: Espectro de un código Kasami de 63 bits a 30 kHz, con varios ciclos de portadora

Una elección correcta del número de ciclos es importante, puesto que hay que ajustarse al ancho de banda de un determinado transductor, ya que como se ha mencionado anteriormente, el transductor se comporta como un filtro en frecuencia. Si el ancho de banda de la señal emitida supera el ancho de banda del transductor, parte de la información de la señal se perderá en la transmisión, resultando en la degradación de las propiedades del código emitido. Sin embargo, aumentar el número de ciclos implica emitir más energía al medio, y además la duración de las secuencias es mayor, aumentando por tanto la zona ciega si el emisor y el receptor son el mismo transductor, por lo que hay que obtener una solución de compromiso.

La señal ya modulada pasa al emisor, y éste se encarga de emitirla al medio. La señal se propaga por el canal subacuático sufriendo los procesos de atenuación y desvanecimiento descritos en el capítulo 3, llegando finalmente al receptor, que se encarga de capturar la señal ultrasónica. En el proceso de recepción hay que aplicar un nuevo filtrado a la señal, ya que la respuesta en frecuencia en recepción tiene un comportamiento análogo al de la figura 4.8, aunque con valores y frecuencias diferentes. Esta señal recibida se correlará con una réplica de la señal emitida de forma asíncrona, puesto que no se dispone de ninguna

referencia temporal.

Esta señal de correlación tendrá una forma similar a lo mostrado en las figuras 4.6 y 4.7, teniendo en cuenta que habrá más ruido debido a la modulación del código, los efectos de ancho de banda limitado del transductor y al deterioro de la señal provocado por el propio medio.

Para un sistema de posicionamiento subacuático basado en la estimación de tiempos de vuelo para el cálculo de distancias entre nodos, el objetivo es identificar el pico de correlación de la primera llegada, de manera que el receptor pueda conocer el instante de recepción. Como el instante de emisión se asume conocido, esta detección permite calcular el tiempo de vuelo de la señal desde que es emitida hasta que llega al receptor, lo que a su vez permite calcular las distancias entre los nodos superficiales y el sumergido, tal y como se describió en la sección 4.1. Una vez que se han obtenido los tiempos de vuelo y se han calculado las distancias, es cuando se suministra esta información al algoritmo de posicionamiento para que calcule la posición del nodo sumergido.

#### 4.4. Algoritmos de posicionamiento estudiados

Una vez que se han detectado las señales codificadas en los nodos superficiales y se ha comunicado esta información al nodo maestro, es cuando éste puede calcular la posición del nodo sumergido mediante el uso de un algoritmo de posicionamiento.

Hoy día existen numerosos algoritmos que permiten calcular la posición del nodo sumergido en base a distintas estrategias, pero en general, los trabajos citados en la sección 2.3 proporcionan muy poca información en lo que respecta a los algoritmos utilizados para el cálculo de la posición. En el caso de los sistemas que usan medidas basadas en tiempos de vuelo, parece indicar que se basan en algoritmos de trilateración esférica por linealización o por método iterativo. En este trabajo se ha planteado como un objetivo comparar el desempeño de cinco algoritmos diferentes, que son:

- Trilateración esférica mediante linealización, debido a que es uno de los algoritmos básicos para calcular la posición mediante trilateración esférica.
- Trilateración esférica por método iterativo, que es otra de las estrategias fundamentales para la resolución de la trilateración esférica. Se ha escogido para ello el algoritmo de Gauss-Newton, que es uno de los algoritmos clásicos para la resolución de este tipo de problemas.
- Determinantes de Cayley-Menger, al ser uno de los algoritmos más novedosos dentro de los utilizados y evaluados dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, donde se ha desarrollado este trabajo.
- Posicionamiento por la técnica de escalado multidimensional (*Multi-Dimensional*

*Scaling*, MDS), lo que permitiría extender el sistema a otras configuraciones adicionales como un sistema de posicionamiento relativo.

- Refinamiento de la posición por Levenberg-Marquardt, para comprobar la bondad del refinamiento de una posición estimada por uno de los algoritmos anteriores, que será más concretamente el MDS.

De estos cinco algoritmos, el uso de las técnicas de Cayley-Menger y MDS se ha empleado en entornos terrestres, pero su uso en entornos subacuáticos no está extendido. Dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, el posicionamiento por determinantes de Cayley-Menger y por la técnica MDS se ha aplicado a sistemas de posicionamiento en entornos terrestres en los trabajos de Ruiz [Rui11] y De Marziani [Mar06], respectivamente, presentando resultados prometedores en lo que respecta a la exactitud en la estimación y tiempos de cómputo.

Considerando todos estos algoritmos, se pretende caracterizar su desempeño para distintas condiciones del medio subacuático y configuración del sistema de posicionamiento planteado. Esta caracterización se realizará de forma estadística mediante el uso del modelo de propagación propuesto en el capítulo 3, representando las condiciones del medio deseadas para que represente diferentes canales y condiciones del mar. El objetivo de esta caracterización es realizar una comparativa de los algoritmos clásicos de posicionamiento (trilateración por linealización y por método iterativo) frente a las técnicas MDS y determinantes de Cayley-Menger. Este estudio se recoge en el capítulo 5.

A continuación se describirán brevemente los distintos algoritmos considerados, centrándose particularmente en su adaptación al problema concreto presentado en esta tesis. Se aconseja acudir al apéndice B y a las correspondientes referencias bibliográficas que se citan para una descripción más detallada de las distintas técnicas de posicionamiento.

#### 4.4.1. Trilateración esférica mediante linealización

Considerando que se tienen  $n$  nodos superficiales de posiciones conocidas  $(x_i, y_i, z_i)$ , y un nodo sumergido de posición desconocida  $(x, y, z)$ , esta técnica calcula la posición de este último asumiendo que se pueden medir las distancias  $r_n$  que hay entre cada nodo superficial y el sumergido.

La solución algebraica a este problema se obtendría planteando las ecuaciones descritas por  $n$  esferas con centro en los nodos superficiales, donde el radio de cada esfera  $r_i$  será igual a la distancia entre cada nodo superficial y el nodo sumergido, según (4.19). Este proceso requiere de un mínimo de tres nodos superficiales no alineados para determinar la posición en tres dimensiones del nodo sumergido, tal y como muestra la figura 4.10. En esta figura, cada nodo superficial, dispuestos en la superficie del mar, se ha representado en un color diferente. La intersección de las tres esferas proporcionaría la estimación de la posición para el nodo sumergido.



$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (4.19)$$

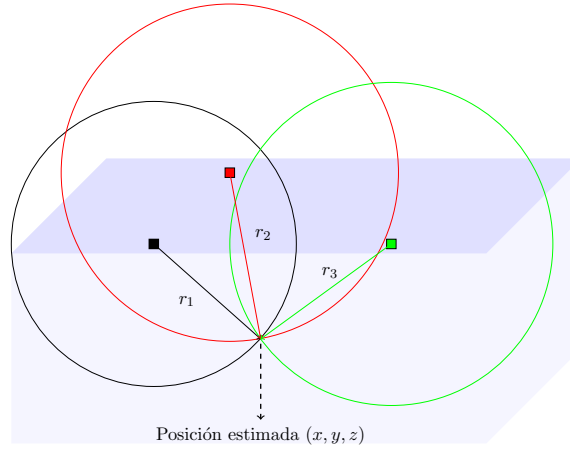


Figura 4.10: Estimación de la posición por intersección de esferas

donde  $n = 1, 2, 3$ . Asumiendo cierta distribución en los nodos superficiales y considerando la linealización de las ecuaciones combinando nodos superficiales, se llega a la ecuación (4.20):

$$(x - x_j)(x_i - x_j) + (y - y_j)(y_i - y_j) = \frac{1}{2}(r_j^2 - r_i^2 + d_{ij}^2) - (z - z_j)(z_i - z_j) \quad (4.20)$$

que en forma matricial se puede expresar como  $A(X - X_1) = AX - AX_1 = B$ , donde las incógnitas están recogidas en la matriz  $X$ . Pasando las matrices conocidas a la derecha de la igualdad, se tiene que

$$AX = B + AX_1 \quad (4.21)$$

donde  $B + AX_1 = C$ . Se obtiene entonces un sistema de ecuaciones lineales con dos incógnitas, donde si se particulariza para el caso  $j = 1$ , se obtiene:

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ \vdots \\ C_{1n} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Como la solución del sistema viene dada por  $X = A^{-1} \cdot C$ , calculando la inversa de  $A$  se obtiene la solución para la posición del nodo sumergido. Una descripción más detallada de este algoritmo se ha recogido en el apéndice B.1.

#### 4.4.2. Trilateración esférica por minimización de una función de coste

Este método consiste en la minimización de una función de coste de forma iterativa. En este trabajo se ha empleado el método de Gauss-Newton, en el que la función de coste

consiste en la suma de los errores cuadráticos de cierta variable, que en el caso particular del sistema propuesto, será la distancia. Es un método que proporciona muy buenos resultados en la estimación de la posición, aunque tiene la contrapartida de que al ser un método iterativo presenta más coste computacional. Adicionalmente, necesita una estimación inicial de la posición, que debe ser lo suficientemente cercana a la real como para que el método converja [Roa05].

Partiendo de esta estimación inicial del nodo sumergido  $P_{k=0} = (x', y')$ , de las posiciones conocidas de las boyas  $(x_i, y_i, z_i)$  y de las distancias medidas entre las boyas y el nodo sumergido  $r_i$ , se tiene que

$$r'_i = \sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2 + (z_i - z)^2} \quad (4.23)$$

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (4.24)$$

donde  $i = 1, 2, \dots, n$ . Elevando al cuadrado ambos términos de la igualdad y como la coordenada  $z$  del nodo sumergido es conocida, se llega a

$$h'_i = r'^2_i - (z_i - z)^2 = (x_i - x')^2 + (y_i - y')^2 \quad (4.25)$$

$$h_i = r^2_i - (z_i - z)^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \quad (4.26)$$

Por otra parte, la función de coste viene dada por

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n (h'_i - h_i)^2 = \sum_{i=1}^n [f_i(x, y)]^2 \quad (4.27)$$

Atendiendo a una solución del tipo  $A \cdot X = B$ , se pueden construir las matrices [Roa05]:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x'} & \frac{\partial f_1}{\partial y'} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x'} & \frac{\partial f_2}{\partial y'} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x'} & \frac{\partial f_n}{\partial y'} \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Donde

$$\frac{\partial f_i}{\partial x'} = 2(x_i - x'); \quad \frac{\partial f_i}{\partial y'} = 2(y_i - y'); \quad (4.29)$$

Si  $n = 3$ , la solución se puede calcular como  $X = A^{-1} \cdot B$ . En caso de disponer de más boyas en la superficie, la solución general se calcula de la forma dada en (4.30)

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (4.30)$$

De esta forma se puede obtener el valor de la matriz  $X$ , y a partir de ella se puede obtener una nueva estimación de la posición del nodo sumergido  $P_{k+1} = (x'_{k+1}, y'_{k+1})$ , dada por:

$$P_{k+1} = P_k - X_k \quad (4.31)$$

donde para la primera estimación, en  $k = 0$ , se asume que la posición estimada  $P_{k=0} = (x', y')$  se calcula de forma aleatoria y dependiente de las dimensiones del entorno donde se mueve el nodo sumergido, de tal manera que se facilite la convergencia del algoritmo. A partir de este punto, este proceso se repite de forma iterativa hasta que se cumple un criterio de tolerancia en la minimización de la función de coste.

### 4.4.3. Determinantes de Cayley-Menger

El operador matemático de Cayley-Menger presenta unas propiedades geométricas que permiten localizar un nodo de una forma rápida y con una precisión similar a los métodos iterativos basados en la resolución directa de las ecuaciones de distancia empleando algoritmos como el de Gauss-Newton [Rui11].

El bideterminante de Cayley-Menger de dos secuencias de  $n$  puntos  $[\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n]$  y  $[\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n]$  se define como [Som58]:

$$D(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n; \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n) = 2 \left( \frac{-1}{2} \right)^n \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & D(\mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1) & D(\mathbf{p}_1, \mathbf{q}_2) & \cdots & D(\mathbf{p}_1, \mathbf{q}_n) \\ 1 & D(\mathbf{p}_2, \mathbf{q}_1) & D(\mathbf{p}_2, \mathbf{q}_2) & \cdots & D(\mathbf{p}_2, \mathbf{q}_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & D(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}_1) & D(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}_2) & \cdots & D(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}_n) \end{vmatrix} \quad (4.32)$$

donde  $D(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j)$  es el cuadrado de la distancia euclídea entre el punto  $\mathbf{p}_i$  y el punto  $\mathbf{q}_j$ . Si las dos secuencias de puntos son iguales, el término  $D(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n; \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n)$  se puede abreviar por  $D(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n)$ , donde a este término se le conoce como determinante de Cayley-Menger.

Dados tres puntos conocidos  $\mathbf{q}_i$  que actúan como balizas, donde  $\mathbf{q}_i = (x_i, y_i, z_i)$ , el objetivo es encontrar las coordenadas de otro punto  $\mathbf{m} = (x, y, z)$ , conociendo la distancia entre los puntos conocidos y dicho punto a localizar,  $r_i$ , con  $i = 1, 2, 3$ . La figura 4.11 muestra un esquema del problema, donde en el caso particular del sistema de posicionamiento subacuático propuesto, los puntos conocidos serían los nodos superficiales equipados con GPS, y el punto a localizar, el nodo sumergido (AUV, ROV, etc.).

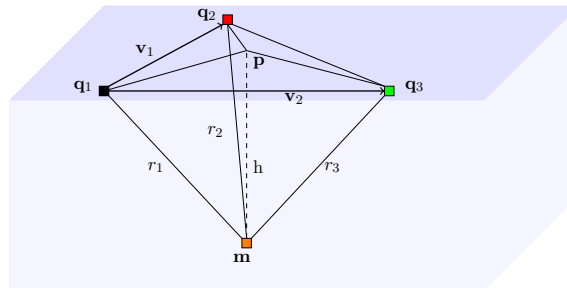


Figura 4.11: Obtención de las coordenadas del punto  $\mathbf{m}$  a partir de las distancias  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  a sendos puntos  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)$  de coordenadas conocidas.

Se puede obtener  $\mathbf{m}$  como [TR05]

$$\mathbf{m} = \mathbf{p} \pm \frac{h}{\|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2\|} (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2) \quad (4.33)$$

siendo  $h$  la altura del tetraedro,  $\mathbf{v}_1 = \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1$  y  $\mathbf{v}_2 = \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_1$ , y las coordenadas del punto  $\mathbf{p}$  se calculan mediante las coordenadas baricéntricas descritas en [MLBD02]. Como el volumen  $V$  de un tetraedro de vértices  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})$  puede obtenerse como  $\frac{1}{3}A_{base}h$ , utilizando las propiedades de los determinantes de Cayley-Menger se puede calcular la altura como

$$h = \frac{3V}{A_{base}} = \sqrt{\frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \quad (4.34)$$

Adicionalmente, se tiene que

$$\|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2\| = \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \quad (4.35)$$

Si se define  $\mathbf{v}_3 = (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)$ , y se tiene en cuenta la ecuación (4.35) y el valor de  $\mathbf{p}$  dado por las coordenadas baricéntricas, el punto  $\mathbf{m}$  se puede obtener como

$$\begin{aligned} \mathbf{m} = & \mathbf{q}_1 - \frac{1}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} (-D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m}) \cdot \mathbf{v}_1 \\ & + D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m}) \cdot \mathbf{v}_2 \pm \left( \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})} \right) \cdot \mathbf{v}_3) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Como este método depende del área entre los nodos superficiales, si estos se encuentran alineados el valor de  $D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)$  sería cero, por lo que aparecería una singularidad y no se podría calcular la posición del punto  $\mathbf{m}$ . Esto también indica que cuanto mayor sea el área entre los tres puntos, menor será el error cometido en la localización de éste, para un mismo nivel de ruido en las medidas. Por este motivo, cuando se tienen más de tres nodos superficiales actuando como puntos conocidos, este método se aplica a cada tripleta de nodos, aplicando una ponderación en función del área formada entre ellos. Si este área es próxima a cero se evita el cálculo de la posición para evitar las singularidades. Una descripción más detallada de este proceso se encuentra en el apéndice B.2.

#### 4.4.4. Escalado métrico multidimensional

La técnica de escalado métrico multidimensional permite obtener una configuración geométrica de los nodos a posicionar en el menor número de dimensiones posible, cuando todo lo que se conoce es una medida de la relación existente entre ellos, en este caso la distancia, almacenadas en una matriz de datos denominada matriz de proximidad. Esta matriz da una idea de la similitud existente en un conjunto de elementos [Mar06].

Existen dos grupos de técnicas MDS: el MDS métrico o clásico, introducido por Torgerson [Tor52], y el denominado no métrico. En esta tesis se ha empleado el MDS métrico,

que asume que la información contenida en la matriz de proximidad presenta propiedades métricas como son las distancias medidas entre objetos.

Para un sistema formado por  $Q$  nodos, se puede definir una matriz de coordenadas  $X$ , de dimensiones  $Q \times D$ , donde  $D$  es la dimensión del espacio considerado, de la forma dada en (4.37).

$$X = \begin{pmatrix} x_1 - x_R & y_1 - y_R & z_1 - z_R \\ x_2 - x_R & y_2 - y_R & z_2 - z_R \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_Q - x_R & y_Q - y_R & z_Q - z_R \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

donde si  $D = 3$ , que será la situación habitual, cada columna de esta matriz  $X$  representa las coordenadas de un nodo respecto de un punto de referencia considerado, mientras que cada una de las filas representa a cada uno de los nodos del sistema. Según Torgerson, el mejor punto de referencia viene dado por el centroide del poliedro cuyos vértices están definidos por cada uno de los nodos del sistema [Tor52]. Eso es así puesto que si estas distancias están contaminadas con ruido aleatorio, al elegir el centroide estos errores tienden a cancelarse. Si se realiza una traslación de la matriz  $X$  desde su punto de referencia al centroide del sistema, se obtiene una nueva matriz  $X^*$  que se calcula como

$$X^* = X - \frac{1}{Q} \cdot \mathbf{1}_{QQ} \cdot X \quad (4.38)$$

Ahora bien, a partir de  $X$  se puede construir una matriz producto de puntos  $B$  según  $B = X \cdot X^T$ . Si se realiza una traslación de la matriz  $X$  desde su punto de referencia al centroide del sistema, la matriz producto de puntos asociada a este cambio de coordenadas,  $B^*$ , se puede expresar como  $B^* = X^* \cdot (X^*)^T$ , donde los elementos de esta matriz  $B^*$  se calculan como [Mar06]

$$b_{ij}^* = -\frac{1}{2} \left[ d_{ij}^2 - \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q d_{iq}^2 - \frac{1}{Q} \sum_{l=1}^Q d_{lj}^2 + \frac{1}{Q^2} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^Q d_{mn}^2 \right] \quad (4.39)$$

Una vez que se obtienen los elementos de la matriz  $B^*$  de la forma dada en (4.39), se puede calcular la matriz de coordenadas  $X^*$  mediante su factorización. Para ello se puede emplear el método de descomposición en valores singulares, obteniéndose entonces

$$B^* = U \cdot S \cdot U^T \quad (4.40)$$

siendo  $S$  una matriz diagonal que contiene los autovalores singulares, mientras que las columnas de  $U$  representan los autovectores asociados a aquellos autovalores distintos de cero. Puesto que la matriz  $S$  es diagonal, (4.40) se puede escribir finalmente como

$$B^* = U \cdot S^{1/2} \cdot S^{1/2} \cdot U^T = (U \cdot S^{1/2}) \cdot (U \cdot S^{1/2})^T \quad (4.41)$$

Teniendo en cuenta que  $B^* = X^* \cdot (X^*)^T$ , la matriz  $X^*$  se puede obtener entonces como

$$X^* = U \cdot S^{1/2} \quad (4.42)$$

Por lo tanto, para un sistema de coordenadas tridimensional, seleccionando las tres primeras columnas de  $X^*$  se obtiene la estimación de las coordenadas de cada nodo con respecto al centroide de la figura que forman. Solo restaría realizar de nuevo una transformación del sistema de coordenadas para obtener las posiciones respecto al sistema de referencia original. Este proceso se realiza mediante una matriz de transformación  $T_r$ , que contempla dos procesos de rotaciones y uno de traslación [Mar06].

Para realizar un posicionamiento tridimensional, es necesario definir un plano a partir de tres nodos, que en el caso concreto del sistema propuesto serán tres nodos superficiales, que estarán en posiciones  $(0, 0, 0)$ ,  $(0, y_2, 0)$  y  $(x_3, 0, 0)$ , respectivamente. La línea imaginaria que une a los dos primeros nodos es la que forma el sistema de referencia original en este algoritmo. Para eliminar cualquier ambigüedad en los resultados, es necesario que los nodos superficiales estén en posiciones fijas. De esta forma, asumiendo que tres nodos van a formar un determinado sistema de referencia, las ambigüedades se resuelven cotejando la posición proporcionada en el MDS para estos nodos con su posición original, puesto que el algoritmo MDS devuelve la posición de todos los nodos del sistema, de forma relativa al nodo maestro ubicado en la posición  $(0, 0, 0)$ . Una descripción más detallada del algoritmo MDS se ha recogido en el apéndice B.3.

#### 4.4.5. Optimización por Levenberg-Marquardt

Los resultados proporcionados por el algoritmo MDS son una buena aproximación de la distribución de los nodos, pero no obtiene la posición precisa en el entorno, debido a que la matriz de distancias está contaminada con ruido, lo que origina una estimación de las coordenadas de cada nodo afectada por un error [Mar06].

Existen diversas alternativas a la hora de mejorar los resultados proporcionados por el MDS mediante un algoritmo iterativo, siendo uno de ellas el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Este algoritmo proporciona una solución numérica a los problemas que tratan de minimizar la suma de un conjunto de ecuaciones no lineales (4.43) que dependen de varios parámetros  $\rho$  comunes a todas ellas.

$$F(\rho) = \sum_{i=1}^Q f_i^2(\rho) = 0 \quad (4.43)$$

Este algoritmo consiste en un proceso iterativo que necesita de un valor inicial aproximado del conjunto de parámetros  $\rho$  a estimar. Una buena elección de este valor inicial permite al algoritmo converger hacia una solución más precisa. En cada iteración del algoritmo, el vector de parámetros  $\rho$  a estimar se sustituye por un nuevo valor:

$$\hat{\rho} = \rho + \Delta\rho \quad (4.44)$$

Para conseguir la variación  $\Delta\rho$  se realiza una aproximación lineal por series de Taylor del conjunto de funciones, de manera que

$$F(\rho + \Delta\rho) \approx F(\rho) + \mathbf{J} \cdot \Delta\rho \quad (4.45)$$

Donde  $\mathbf{J}$  es el Jacobiano de  $F$  evaluado en  $\rho$ . El punto clave del algoritmo de Levenberg-Marquardt es obtener  $\Delta\rho$  evaluando la ecuación (4.46), ajustando para ello el valor de  $\lambda$ , denominado factor de amortiguamiento (*damping factor*):

$$(\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda\mathbf{I}) \cdot \Delta\rho = -\mathbf{J}^T F \quad (4.46)$$

Una vez que se obtiene el valor de  $\Delta\rho$ , se obtiene el nuevo vector de parámetros  $\hat{\rho}$  según (4.44), y se evalúa de nuevo la ecuación (4.43) con el nuevo valor estimado. Si esta estimación cae dentro de los límites definidos se abortan las iteraciones y se considera al último de los parámetros estimados como la solución del sistema. En este trabajo se ha considerado el algoritmo de Levenberg-Marquardt que se incluye en Matlab, utilizando como datos de entrada las posiciones obtenidas con el algoritmo MDS, así como las distancias medidas por el sistema, que están afectadas por ruido.

## 4.5. Resumen

En este capítulo se ha presentado un sistema de posicionamiento subacuático que consiste en una serie de nodos superficiales (boyas o barcos, por ejemplo) equipados con GPS, que calcula la posición de un nodo sumergido mediante la transmisión y recepción de señales acústicas codificadas. Adicionalmente, se ha presentado una descripción de los códigos y algoritmos de posicionamiento estudiados en este trabajo. Los aspectos más relevantes que se pueden extraer de este capítulo son los siguientes:

- El uso de la tecnología GPS permite ubicar a los nodos superficiales de manera sencilla y con poco coste económico, al estar el uso de esta tecnología muy extendido. Esto permite que los nodos superficiales conozcan su posición y además, facilita el sincronismo de estos nodos mediante PPS. Este esquema resulta en un sistema de posicionamiento más sencillo de desplegar y calibrar que los sistemas LBL, y más versátil que los sistemas SBL y USBL, que requieren un barco que siga al nodo sumergido.
- Para obtener la ubicación del nodo sumergido se hace uso de señales acústicas codificadas. El uso de técnicas CDMA aporta más ganancia de proceso al sistema, permitiendo la detección de las señales acústicas en entornos ruidosos, así como la detección simultánea de códigos diferentes, gracias a las propiedades de ortogonalidad que presenta una buena elección de códigos dentro de una determinada familia. Las señales acústicas se han codificado fundamentalmente en sistemas sónar y de

comunicaciones, mientras que su uso en sistemas de posicionamiento está poco explorado. La experiencia previa del grupo ha permitido acotar el estudio de dichos esquemas de codificación a dos, CSS y secuencias Kasami, que presentan una mejora en lo que respecta a la función de autocorrelación y la de correlación cruzada, así como en el número de códigos ortogonales disponibles en el sistema, respecto a los códigos empleados en sistemas ya existentes.

- El uso de técnicas CDMA y el proceso de medida descrito permiten la ampliación del sistema de manera inmediata para localizar varios nodos sumergidos que pueden estar navegando en el entorno donde se despliega el sistema de posicionamiento. Únicamente hay que considerar un esquema de codificación adecuado, eligiendo siempre aquellos códigos que proporcionen mejores propiedades de ortogonalidad dentro de una determinada familia.
- La ubicación del nodo sumergido se realiza en el nodo maestro, que será generalmente el barco donde se encuentra el equipo, o una boya maestra con capacidad para comunicarse con una estación en tierra. De esta manera, el equipo que esté llevando a cabo las pruebas puede conocer la posición del nodo sumergido (que será generalmente un ROV o un AUV) en el entorno donde se está llevando a cabo el experimento, lo que resulta de vital importancia en tareas de recuperación o de guiado.
- El posicionamiento del nodo sumergido se realizará en el plano XY, asumiendo que su profundidad es conocida mediante un sensor de presión. Esta profundidad debe ser comunicada al nodo maestro mediante un protocolo de comunicaciones acústico, cuyo desarrollo está fuera de los objetivos de esta tesis.
- Se ha propuesto el uso de técnicas de posicionamiento poco estudiadas en estos entornos, como el posicionamiento por MDS o por determinantes de Cayley-Menger, lo que permitirá comparar el desempeño de estos frente a otros algoritmos clásicos de posicionamiento basados en trilateración esférica por linealización o por Gauss-Newton.



## Capítulo 5

# Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en esta tesis, tanto para el modelo de propagación desarrollado como para el sistema de posicionamiento propuesto. De esta manera, los resultados comprenden distintos estudios sobre la validez del modelo de propagación, así como su uso para estudiar los efectos del canal subacuático en el sistema de posicionamiento propuesto y el análisis del funcionamiento de dicho sistema de posicionamiento bajo distintas configuraciones y algoritmos de posicionamiento.

El modelo desarrollado contempla los efectos más importantes que tienen lugar en la propagación acústica en entornos subacuáticos, incluyendo entre ellos el efecto dinámico provocado por el oleaje generado por el viento, que no suele estar contemplado en los modelos estudiados en la bibliografía. Debido a la complejidad que entraña realizar pruebas en entornos reales en este medio (por la imposibilidad de controlar los parámetros medioambientales, entre otros factores), el uso de modelos de propagación proporcionará una información de gran importancia como primera aproximación al desarrollo del sistema final.

El sistema propuesto contempla una serie de nodos superficiales de posiciones conocidas gracias al GPS, así como un nodo sumergido a localizar. Para obtener la posición de este nodo sumergido se emplean señales acústicas codificadas. El proceso de emisión, recepción y detección de códigos permite obtener las distancias entre los nodos de referencia y el nodo sumergido, a partir de las cuales se puede calcular la posición de éste, teniendo en cuenta que el medio subacuático introducirá un error a través de diferentes procesos que afectan a la correcta estimación de las señales codificadas.

Además del error cometido en la medida de distancias entre los nodos superficiales y el sumergido, hay que tener en cuenta que tanto la posición proporcionada por el GPS como la propia configuración geométrica del sistema y el algoritmo de posicionamiento empleado influirán también en la estimación final de la posición del nodo sumergido calculada por dichos algoritmos. Por lo tanto, caracterizar esta influencia será de gran importancia para estudiar la viabilidad del sistema propuesto.

Para ello, se mostrarán a continuación los distintos resultados obtenidos. En primer lugar se presentarán los resultados que han permitido validar el modelo de propagación desarrollado, de manera que se pueda considerar que el estudio realizado con él es fiable. Posteriormente se mostrará un estudio comparativo de los dos esquemas de codificación considerados para las señales acústicas, lo que permitirá escoger el que proporcione un mejor comportamiento en este medio. A continuación se realizará un estudio detallado de la influencia del canal subacuático en el error en la estimación de distancias utilizando el esquema de codificación seleccionado. Finalmente, se mostrarán los resultados que caracterizan el funcionamiento del sistema de posicionamiento para distintas configuraciones geométricas, errores de GPS y sensor de presión, y distintos algoritmos de posicionamiento.

## 5.1. Validación del modelo de propagación

En esta sección se recogen los resultados que han permitido validar el modelo de propagación. Según se ha podido comprobar en la literatura y se recogió en la sección 2.1, la mayoría de modelos de propagación desarrollados han sido validados mediante la comparación con otros modelos existentes, debido a la dificultad de obtener una referencia (*ground truth*) fiable en entornos reales, teniendo que recurrir al GPS para establecer las comparativas, con el consiguiente error asociado en la comparación.

La validación afrontada en este trabajo se ha dividido en tres pruebas diferentes. Primero se recogerán los resultados obtenidos para una comparativa del modelo desarrollado frente a otro ya establecido en la literatura, como es BELLHOP [PB87], comparando los tiempos de vuelo y pérdidas de transmisión obtenidos para diferentes entornos. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en entornos reales controlados, lo que permitirá solventar las inexactitudes cometidas en entornos abiertos como el mar o un embalse. Por último, se ofrecerá una comparativa para entornos reales abiertos, utilizando para ello resultados obtenidos de la literatura.

### 5.1.1. Comparativa del modelo propuesto con BELLHOP

El primer paso en la validación del modelo ha consistido en establecer una comparación con el modelo BELLHOP, uno de los más extendidos y utilizados de trazado de rayos. Para ello se ha hecho uso de la herramienta Acoustic Toolbox para Matlab [Cen14], disponible de forma gratuita para esta plataforma.

Este estudio consiste en la comparación de los resultados proporcionados por ambos modelos en lo que respecta a los tiempos de vuelo y pérdidas de transmisión para las distintas llegadas obtenidas, para tres entornos diferentes: un entorno con perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría, otro con perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría, y finalmente un entorno con perfil de velocidad del sonido variable y con

batimetría.

En todos los casos se ha considerado un emisor y un receptor separados una cierta distancia y sumergidos a una determinada profundidad (cuyos valores se especificarán posteriormente). El emisor transmite una señal de una frecuencia de 20 kHz, considerándose un fondo de barro con densidad  $1941 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y velocidad del sonido  $1749 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , mientras que la densidad del agua es de  $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En todos los casos se lanzan 100 rayos entre  $\pm 20^\circ$ .

No se ha considerado viento en el modelo desarrollado para este estudio, puesto que BELLHOP no incluye este efecto. Igualmente, puesto que en BELLHOP se introduce la velocidad del sonido manualmente, en el modelo desarrollado se ha procedido del mismo modo, sin calcular por tanto este valor mediante la ecuación de Chen y Millero. De esta manera se ha intentado conseguir que los parámetros de entrada de ambos modelos sean lo más parecido posible. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

### A. Entorno de perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría

Para este entorno se ha considerado una profundidad de 150 m y una distancia entre emisor y receptor de 1 km, estando estos transductores sumergidos a una profundidad de 10 y 40 m, respectivamente. La velocidad del sonido tiene un valor constante en toda la columna de agua igual a  $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

El trazado de rayos obtenido con ambos modelos se representa en la figura 5.1, donde en (a) aparece el trazado obtenido con el modelo propuesto, y en (b) el trazado obtenido con BELLHOP, donde se puede observar que los resultados obtenidos por ambos modelos en cuanto al trazado son prácticamente idénticos.

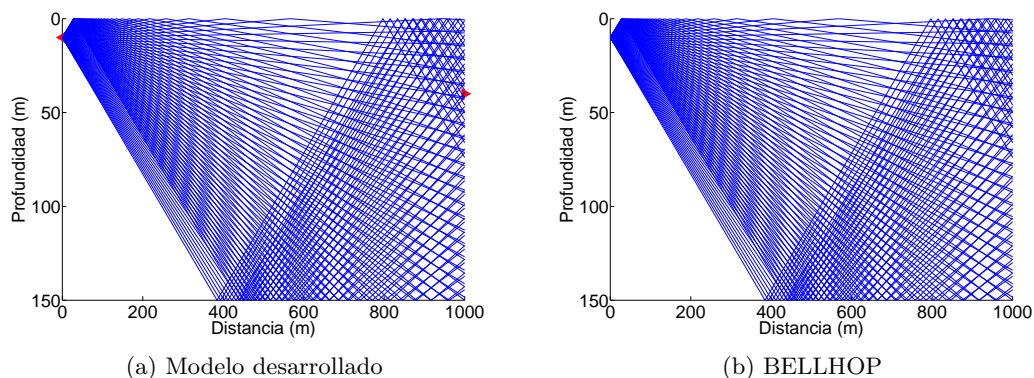


Figura 5.1: Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría

Considerando las llegadas en el receptor ubicado a 40 m de profundidad, se representan a continuación en la figura 5.2 los tiempos de vuelo de dichas llegadas con sus correspondientes pérdidas de transmisión, donde se han representando las obtenidas con el modelo con puntos

azules, mientras que las obtenidas con BELLHOP se han representado con cruces rojas. En esta figura se puede observar que la diferencia en los tiempos de vuelo es despreciable (del orden de décimas de milisegundo), aunque sí se aprecian algunas diferencias respecto a las pérdidas de transmisión, distinguiéndose entre 10 y 12 dB en los resultados obtenidos con el modelo propuesto. Atendiendo a estos resultados y considerando que las pérdidas por absorción a 20 kHz son del orden de 2 dB, y que las pérdidas por divergencia geométrica a 1 km son 60 dB, no es fácil explicar porqué el valor de las pérdidas para el camino directo obtenidas por BELLHOP es de 75 dB.

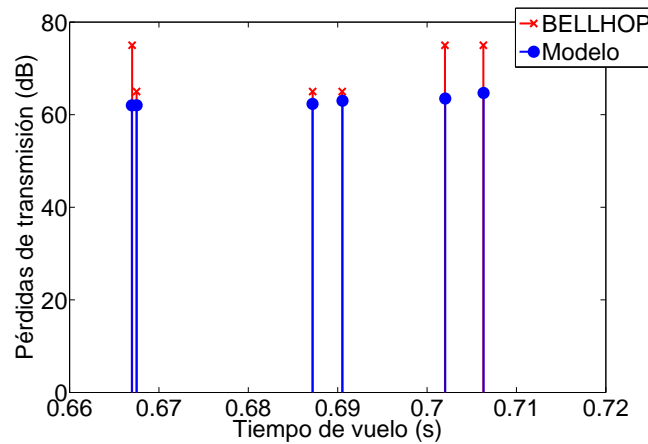


Figura 5.2: Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y sin batimetría

## B. Entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría

Para este caso se ha considerado que el emisor y receptor están separados 2 km, donde las profundidades a la que se sitúan ambos son las mismas que en el caso anterior, es decir, 10 y 40 m respectivamente. La profundidad del fondo es de 300 m en el punto donde se encuentra el emisor, y va descendiendo hasta alcanzar 200 m donde se ubica el receptor.

Nuevamente la velocidad del sonido tiene un valor constante en toda la columna de agua e igual a  $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . El trazado de rayos obtenido con ambos modelos se representa en la figura 5.3, donde en (a) aparece el trazado obtenido con el modelo desarrollado, y en (b) el trazado obtenido con BELLHOP. Al igual que con el entorno anterior, los resultados obtenidos por ambos modelos en cuanto al trazado de rayos son prácticamente idénticos.

Considerando las llegadas en el receptor ubicado a 40 m, se representan a continuación en la figura 5.4 los tiempos de vuelo de dichas llegadas con sus correspondientes pérdidas de transmisión, donde se han representando las obtenidas con el modelo con puntos azules, mientras que las obtenidas con BELLHOP se han representado con cruces rojas. Al igual que en el caso anterior, los tiempos de vuelo son prácticamente idénticos, detectando además los mismos bloques de llegadas en ambos casos con la excepción del último bloque, donde

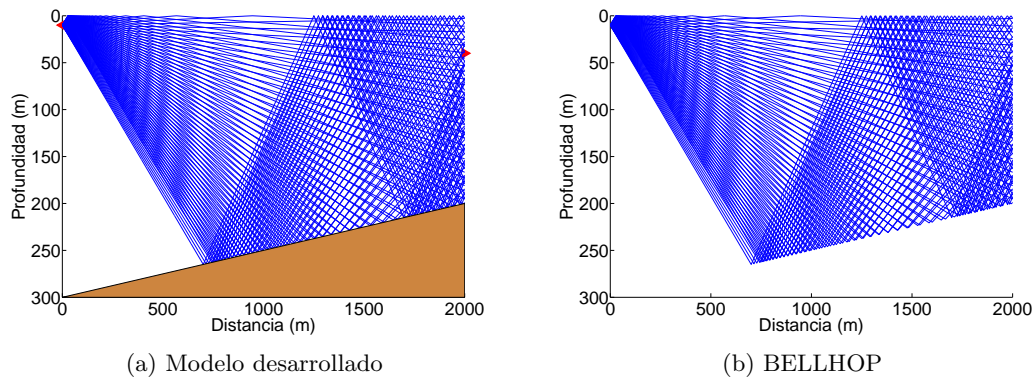


Figura 5.3: Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría

el modelo sólo detecta una llegada y BELLHOP predice dos. En la primera llegada el modelo también predice dos llegadas, aunque con las mismas pérdidas de transmisión aproximadamente, por lo que aparecen solapadas. Las pérdidas de transmisión difieren de las obtenidas con el modelo propuesto, con llegadas que difieren menos de 5 dB, hasta otras cuya diferencia aumenta hasta los 30 dB.

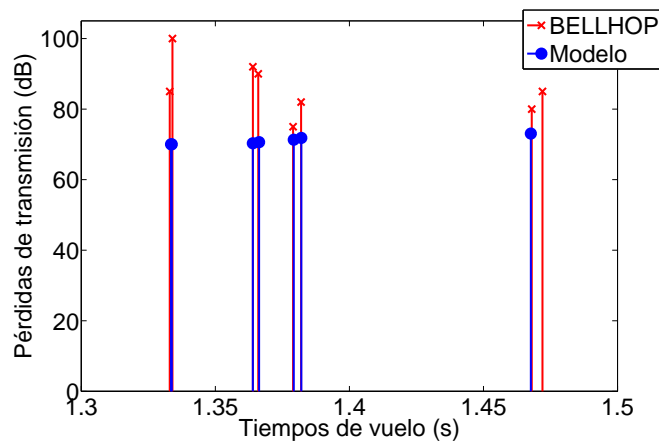


Figura 5.4: Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría

### C. Entorno con perfil de velocidad del sonido variable y con batimetría

Por último, se ha considerado una situación donde la velocidad del sonido no es constante, sino que forma un canal superficial. El perfil de batimetría es el mismo que en el caso anterior, y se utiliza también la misma profundidad para el emisor (10 m), mientras que el receptor se ha ubicado ahora a una profundidad de 20 m para obtener más llegadas provenientes del canal superficial.

El trazado de rayos obtenido con ambos modelos se representa en la figura 5.5, donde en (a) aparece el trazado obtenido con el modelo propuesto, y en (b) el trazado obtenido con BELLHOP. Nuevamente las diferencias en los trazados obtenidos son mínimas, a pesar de haber considerado implementaciones diferentes para el efecto de curvatura introducido por el perfil de velocidad del sonido.

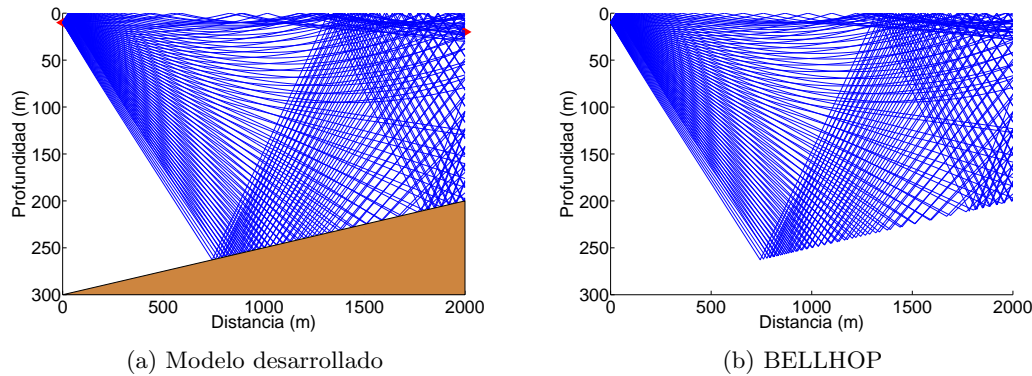


Figura 5.5: Trazado de rayos para el entorno de perfil de velocidad del sonido constante y con batimetría

Considerando las llegadas en el receptor ubicado a 20 m, se representan en la figura 5.6 los tiempos de vuelo de dichas llegadas con sus correspondientes pérdidas de transmisión, donde nuevamente se han representando las obtenidas con el modelo con puntos azules, mientras que las obtenidas con BELLHOP se han representado con cruces rojas. Los tiempos de vuelo son prácticamente idénticos en ambos casos, salvo con la excepción de la primera llegada, que presenta una diferencia de 0.8 ms aproximadamente. Las pérdidas de transmisión obtenidas por ambos modelos son más parecidas en este caso, especialmente en el primer bloque de llegadas, con la excepción de la última. En el siguiente bloque de llegadas los tiempos de vuelo son nuevamente parecidos, donde las diferencias entre los valores obtenidos para las pérdidas oscilan entre 2 y 4 dB.

En base a estos resultados, se puede comprobar que el modelo desarrollado obtiene unos tiempos de vuelo prácticamente idénticos a los obtenidos por un modelo de trazado de rayos ampliamente establecido en los últimos décadas como es BELLHOP. Las inexactitudes encontradas se achacan a:

- La diferente implementación del trazado de rayos, que provocará pequeñas variaciones en este trazado y por tanto en el cómputo de los tiempos de vuelo.
- Al proceso de detección de las llegadas en el receptor, lo que también afectará a la estimación de los tiempos de vuelo.
- Con mayor relevancia, a las diferentes ecuaciones empleadas para modelar las pérdidas por absorción y rebotes en el fondo, especialmente estas últimas, ya que las máximas diferencias aparecen en los dos primeros entornos, donde la interacción con el fondo es

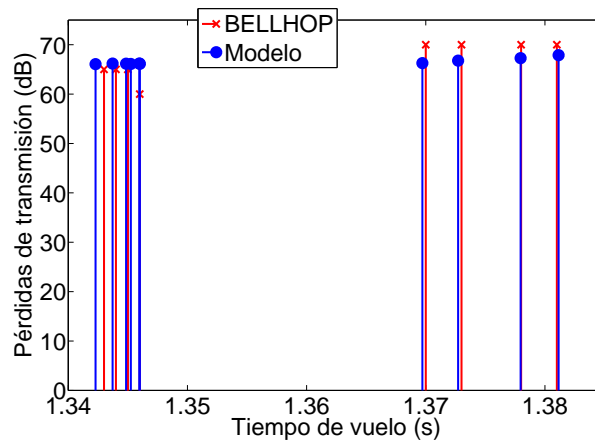


Figura 5.6: Tiempos de llegada y pérdidas de transmisión para el entorno de perfil de velocidad del sonido variable y con batimetría

mayor. De la misma manera, en el tercer entorno considerado las mayores diferencias aparecen en el segundo bloque de llegadas, que se corresponderán a los rayos con más camino recorrido, es decir, que hayan sufrido algún rebote o rebotes en el fondo.

En cualquier caso y atendiendo a los valores presentados, los resultados obtenidos por el modelo desarrollado se ajustan bastante a los proporcionados por BELLHOP, especialmente en lo que respecta a los tiempos de vuelo.

### 5.1.2. Pruebas reales en entornos controlados

La validación del modelo se ha completado comparándolo con resultados reales obtenidos en entornos controlados. Se han realizado dos pruebas diferentes, lo que permite comprobar la fiabilidad del modelo en dos entornos de distintas dimensiones y bajo condiciones de medida también diferentes.

Estos entornos controlados consisten en dos piscinas rectangulares. Una piscina se encuentra en las instalaciones del *Ocean Systems Group* de la Universidad de Oporto, Portugal (entorno 1), y la otra se encuentra situada en unas instalaciones deportivas en Alcalá de Henares, España (entorno 2).

El proceso de medida es similar en ambas pruebas: se ubican un emisor y un receptor en extremos opuestos de las piscinas, y una señal acústica, consistente en un código Kasami modulado en BPSK, es transmitido por el emisor. Esta señal codificada llegará tras un determinado tiempo al receptor con un patrón característico de multicamino, y será almacenada en una memoria. Una vez que se obtiene la señal recibida, se aplica un filtro acoplado al código emitido para obtener los distintos tiempos de vuelo, que se compararán con los proporcionados por el modelo de propagación. Para la obtención de estos tiempos de vuelo es necesario que exista un sincronismo entre el emisor y el receptor. Este

sincronismo se ha obtenido de manera diferente en ambas pruebas, como se especificará más tarde en su correspondiente apartado.

Conviene recordar que el modelo de propagación se ha desarrollado para un entorno bidimensional en el plano vertical que une al emisor con el receptor, asumiendo espacios abiertos. Sin embargo, las dimensiones de las piscinas son muy pequeñas comparadas con entornos abiertos, lo que da lugar a una contribución significativa de las paredes laterales de éstas al multicamino en la señal recibida, donde esta contribución no está contemplada originalmente en el modelo.

Debido a la forma regular de estas piscinas, se pueden incluir algunos de estos rebotes provenientes de paredes laterales en la señal recibida obtenida por el modelo. Para ello se usa el modelo para obtener la señal recibida en el plano vertical de propagación, y se almacena. A continuación se considera una rotación de  $90^\circ$  en el plano de propagación, por lo que ahora el modelo obtendría la propagación en el plano horizontal que une emisor y receptor, tal y como indica la figura 5.7. En esta figura se ha representado el plano vertical en línea continua, el plano horizontal en línea discontinua, y el emisor (E) y receptor (R) en trapecios rojos.

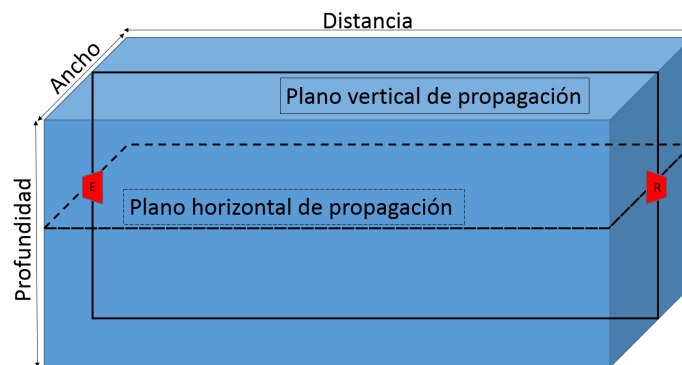


Figura 5.7: Planos de propagación considerados para la validación del modelo en entornos controlados

Para realizar esta simulación en el plano horizontal se consideran las dimensiones de la piscina en este plano de propagación, mientras que para las pérdidas de transmisión por rebotes se tiene en cuenta ahora que ambas superficies están compuestas por el material del que está hecha la piscina, que será cemento en ambos casos. La señal recibida en este plano de propagación se añade a la obtenida en el plano vertical, excepto la proveniente del camino principal, que será la misma en ambos casos, por lo que sólo se tiene en cuenta una vez.

Adicionalmente, se consideran también los rebotes provenientes de los muros ubicados tras el emisor y el receptor, puesto que éstos no están pegados a la pared de las piscinas. Considerando un camino en línea recta entre ambos, la distancia recorrida por la onda acústica es sencilla de calcular. Se ha considerado que puede haber tres tipos de rebotes debidos a estas paredes: un rebote en la pared ubicada tras el emisor, otro rebote debido a



la pared ubicada tras el receptor, y por último un rebote en ambas paredes. No obstante, la inclusión de estos tres rebotes dependerá de los patrones del emisor y del receptor, por lo que se detallarán en cada prueba correspondiente.

Para ambas pruebas y en lo que respecta a los valores empleados para la simulación de la señal recibida, se ha considerado una densidad del agua de  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , y una densidad para el fondo de  $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , que se corresponde con la del cemento. Para este material se ha tomado una velocidad del sonido igual a  $3600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [The14]. Para estas pruebas no se ha considerado velocidad del viento, puesto que la piscina del entorno 1 está localizada en el interior de un edificio, y en la prueba realizada en el entorno 2 la superficie estaba en calma.

En ambos casos se ha considerado un valor favorable para el nivel de ruido, teniendo en cuenta que ambos son escenarios controlados que no están sujetos a las fuentes de ruido presentes en entornos abiertos. No obstante, para una mejor consideración del nivel de ruido en pruebas en entornos abiertos, sería aconsejable medir los niveles de ruido habituales en dichos entornos, antes de efectuar la comparativa.

La configuración para ambas pruebas se resume en la tabla 5.1. A continuación se mostrarán los resultados más relevantes obtenidos en ellas.

Variable	Entorno 1	Entorno 2
Dimensiones ( $\text{m}\times\text{m}\times\text{m}$ )	$3.57\times 4.40\times 1.73$	$25\times 12\times 1.4$ a $2.15$
Densidad del agua ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1000	1000
Densidad del fondo ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2300	2300
Velocidad del sonido en el fondo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3600	3600
Frecuencia de la señal emitida (kHz)	25	200
Sincronismo	Cable	Enlace de radiofrecuencia
Profundidad transductores (m)	0.53	0.50
Ruido (dB)	30	12

**Tabla 5.1:** Configuración para las pruebas en entornos controlados

### A. Pruebas en el entorno 1

Las dimensiones de esta piscina se muestran en la figura 5.8, donde además hay que considerar que la profundidad es constante, con un valor de 1.73 m. Tanto el emisor como el receptor se ubicaron en dos boyas a una profundidad de 0.53 m, y consisten en dos transductores omnidireccionales T257 de Neptune Sonar Ltd., que presentan un ancho de banda de 16 kHz y una frecuencia central de 25 kHz.

La señal capturada se almacena en una FPGA a una frecuencia de muestreo de

106.582 kHz. La temperatura del agua en la piscina presentaba un valor de  $21^{\circ}\text{C}$ , que se asume constante para toda la columna de agua. En esta prueba el sincronismo se obtuvo conectando con un cable el emisor y el receptor a la misma FPGA, que es la encargada de iniciar la emisión acústica mediante la transmisión de la señal, que está almacenada en memoria.

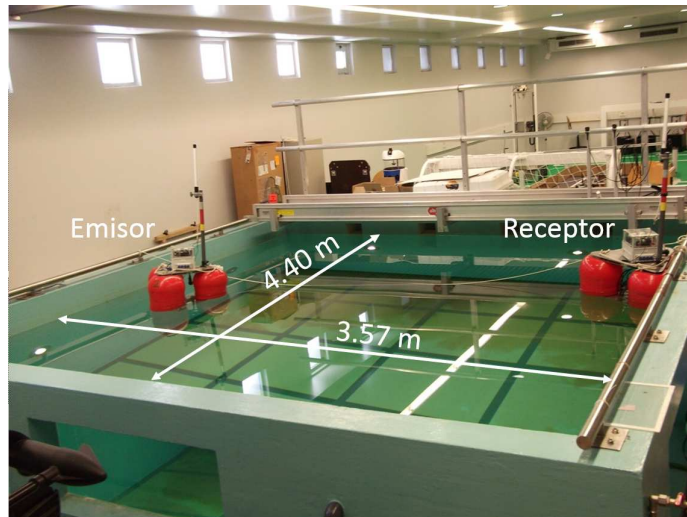


Figura 5.8: Dimensiones del entorno 1

Las figuras 5.9 (a) y (b) muestran el trazado de rayos obtenido con el modelo para este entorno para el plano vertical y horizontal entre emisor y receptor, respectivamente, donde se han empleado 20 rayos por claridad visual entre  $\pm 85^{\circ}$  para replicar el comportamiento omnidireccional de los transductores. Hay que resaltar que aunque se han mostrado 20 rayos para visualizar los caminos más fácilmente, para hacer el estudio de la propagación con el modelo se han empleado 600 rayos. En estas figuras se puede comprobar la importancia del multicamino en este entorno, apreciándose el gran número de rayos que impactan en la región del receptor, lo que era de esperar por las reducidas dimensiones de la piscina y el carácter omnidireccional de los transductores.

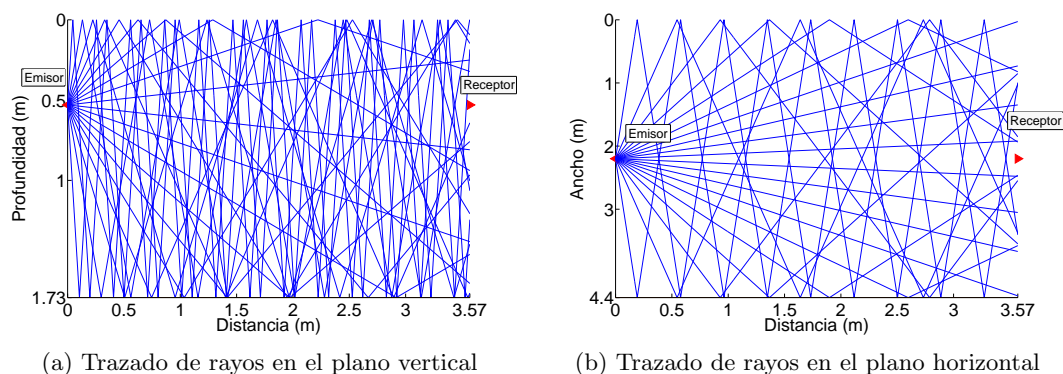


Figura 5.9: Trazado de rayos en el entorno 1

Esta señal emitida consiste en un código Kasami de 63 bits modulado en BPSK a 25 kHz usando tres ciclos por símbolo de modulación, consiguiendo así una duración de 7.6 ms y un ancho de banda de 10 kHz, ajustándose así a los requisitos del emisor T257.

En lo que respecta a la señal sintética obtenida por el modelo, se han emitido 600 rayos entre  $\pm 85^\circ$  para los dos planos de propagación considerando las dimensiones de la piscina definidas en la figura 5.8, teniendo en cuenta además los tres rebotes en las paredes tras los transductores previamente definidos, debido a que éstos son omnidireccionales. Adicionalmente, se asume un viento nulo y un valor para la relación señal-ruido de 30 dB, lo que representa un nivel de ruido favorable, teniendo en cuenta que se está midiendo en un entorno controlado.

Puesto que el receptor normaliza la señal para almacenarla en la FPGA no se obtienen valores absolutos de amplitud, por lo que se ha optado por normalizar también los valores de las señales de correlación obtenidas. Estas señales de correlación se muestran en la figura 5.10, donde en (a) se muestra la señal de correlación real, y en (b) la señal de correlación sintética. Se puede apreciar en estos resultados que la señal sintética es más corta que la señal real. Esto se debe a las reducidas dimensiones de la piscina, lo que provoca un multicamino proveniente de paredes laterales muy importante, así como a la baja atenuación de la señal acústica, de manera que la señal puede rebotar numerosas veces antes de extinguirse. Describir este multicamino tan complejo se sale de los objetivos del modelo de propagación desarrollado, aunque hay que resaltar que el modelo predice correctamente los instantes de llegada de los primeros caminos que llegan al receptor, antes de que los rebotes laterales cobren importancia.

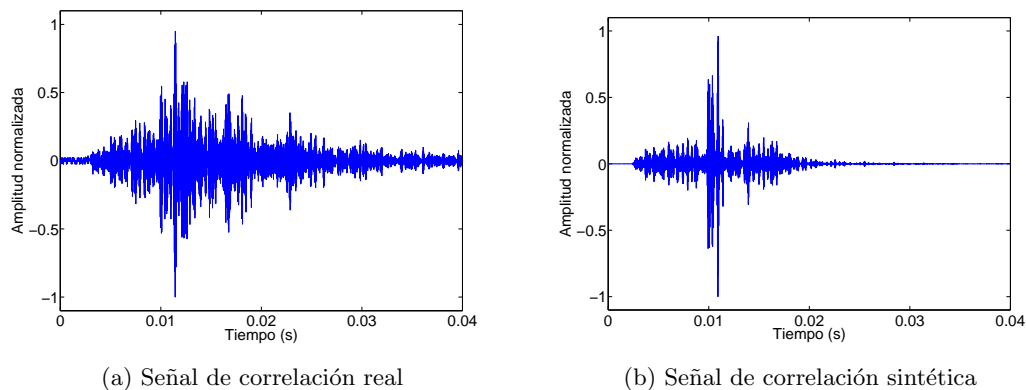
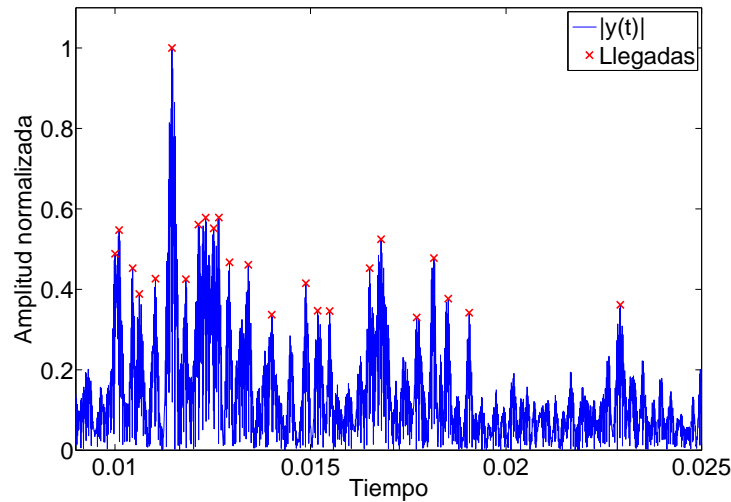


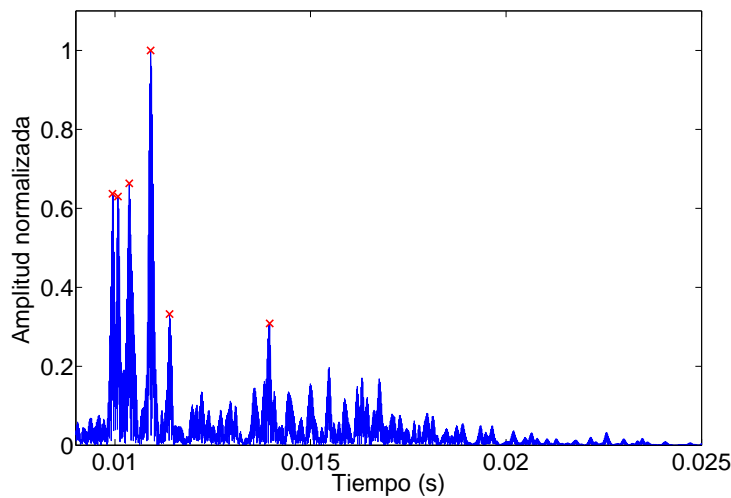
Figura 5.10: Correlación obtenidas en el entorno 1

Como pueden existir cambios de fase debido al rebote en la superficie de separación agua-aire, se ha representado en la figura 5.11 el valor absoluto de la señal de correlación  $|y(t)|$  de la figura 5.10. Esta representación se ha hecho en una ventana temporal cercana a la primera llegada, identificando aquellos picos cuya amplitud es mayor que el ruido de correlación. Tal y como se puede comprobar, el modelo predice que la primera llegada no es la más energética, y los tiempos de vuelo de estas primeras llegadas son muy parecidos,

aunque no tanto las amplitudes.



(a) Señal real



(b) Señal sintética

Figura 5.11: Valor absoluto de las señales de correlación para el entorno 1

Los tiempos de vuelo obtenidos para la señal real ( $TOF_{real}$ ) y sintética ( $TOF_{sin}$ ) de las diez primeras llegadas se han recogido en la tabla 5.2. Estos valores muestran que los tiempos de vuelo son detectados razonablemente bien para las primeras llegadas incluso para un escenario tan adverso como éste: para las primeras seis llegadas el modelo predice cinco, con tiempos de vuelo que presentan errores entre  $28 \mu s$  y  $121 \mu s$ . Sin embargo, la amplitud de las señales no se predice con la misma precisión, debido a la gran interferencia que está teniendo lugar.

$TOF_{real}$ (ms)	$TOF_{sin}$ (ms)
2.441	2.376
2.544	2.516
2.892	2.804
3.060	
3.473	3.352
3.895	3.836
4.252	
4.571	
4.759	
4.965	

**Tabla 5.2:** Tiempos de vuelo detectados para las señales real y sintética, en el entorno 1

## B. Pruebas en el entorno 2

Los resultados obtenidos en la prueba anterior reflejan la importancia de las paredes laterales en un entorno tan pequeño, máxime teniendo en cuenta que se usaron emisores y receptores omnidireccionales. Con el objetivo de realizar una prueba de validación adicional y corroborar la importancia de este efecto, se realizó una segunda medida en una piscina de mayores dimensiones y empleando un emisor direccional con una frecuencia de portadora de 200 kHz, consiguiendo así minimizar el efecto de las paredes laterales en la señal recibida.

Las dimensiones de la piscina se muestran en la figura 5.12, donde también se detallan la posición del emisor y el receptor. Tanto el emisor como el receptor se encuentran a 50 cm de profundidad y separados 50 cm respecto a las paredes de la piscina, por lo que la distancia real entre ellos es de 24 m. En esta prueba, la batimetría es variable: en el punto donde se ubica el emisor la profundidad es de 1.40 m, alcanzando un máximo de 2.15 m a una distancia de 20 m, y por último, tomando un valor de 1.85 m en la posición del receptor, a 24 m del emisor.

El emisor es un transductor ProWave 200LM450 con un ancho de banda de 25 kHz y un patrón angular de  $20^\circ$  (considerando unas pérdidas de 6 dB a esta apertura), tanto para el plano vertical como para el horizontal. Por su parte, el receptor es un hidrófono omnidireccional Reson TC4034, que adquiere la señal y la almacena en un ordenador con el sistema de adquisición Avisoft a una frecuencia de 1 MHz. La emisión de la señal se realizó gracias a un transmisor de códigos versátil diseñado dentro del Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, que permite la selección de distintos esquemas de codificación y frecuencias [dD13].

La figura 5.13 (a) muestra un trazado de rayos para este entorno en el plano vertical de propagación entre emisor y receptor, mientras que 5.13 (b) muestra el trazado para el

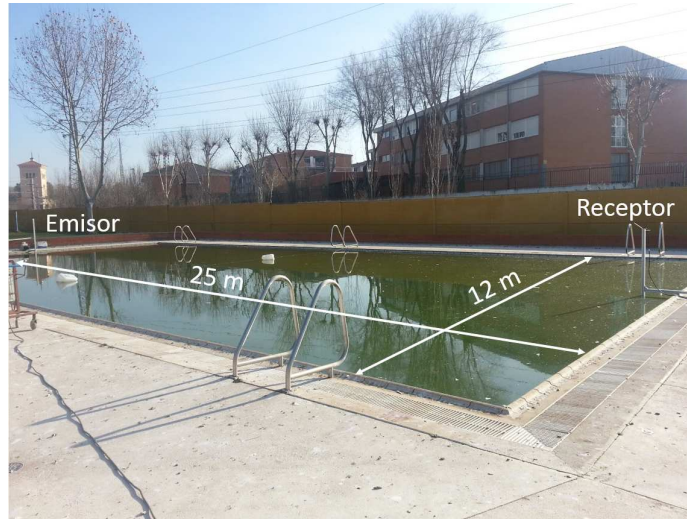


Figura 5.12: Dimensiones del entorno 2

plano horizontal. Para este trazado se han considerado 20 rayos por claridad visual entre  $\pm 30^\circ$  y se han introducido en el modelo las dimensiones de la piscina dadas en la figura 5.12. El patrón de emisión del ProWave ha sido aproximado como el mostrado en la figura 5.14, de manera que se consideran unas pérdidas de 6 dB para un haz de  $20^\circ$  tal y como especifica el fabricante, y se añaden pérdidas extras de 3 dB cada vez que el haz se hace  $20^\circ$  más ancho, incorporando así un modelo sencillo para el patrón angular del emisor. En estas figuras se puede comprobar la reducción del multicamino que tiene lugar en esta piscina, debido a las mayores dimensiones y a la direccionalidad del emisor. Este efecto se aprecia más notablemente en la propagación horizontal, donde se aprecian menos llegadas que en la figura 5.9 (b), lo que repercutirá en una mejor predicción del modelo.

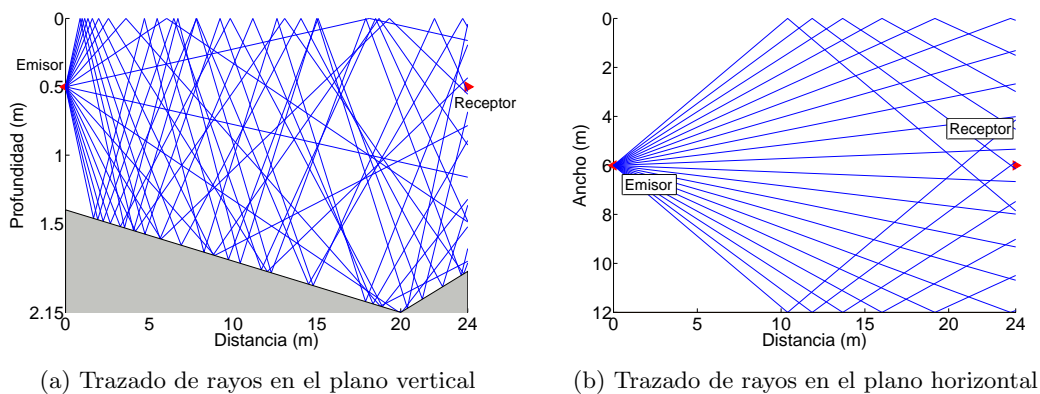


Figura 5.13: Trazado de rayos en el entorno 2

En esta prueba el sincronismo se ha obtenido mediante una antena de radiofrecuencia que emite un pulso a 433 MHz cuando se produce la emisión acústica, y un módulo de radiofrecuencia que detecta la llegada de este pulso en el receptor.

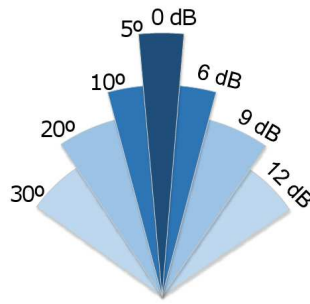


Figura 5.14: Modelo considerado para el patrón angular del emisor ProWave 200LM450

La señal emitida consiste en un código Kasami de 63 bits modulado en BPSK a 200 kHz usando dos ciclos por símbolo de modulación, obteniendo una duración de señal de 0.6 ms y un ancho de banda de 100 kHz. El hecho de que el ancho de banda del transductor sea menor que el de la señal emitida provoca una degradación en las propiedades de ortogonalidad de la señal emitida que no es determinante en este estudio, ya que no se emiten otras señales.

En lo que respecta a la señal sintética obtenida por el modelo, se han emitido 600 rayos entre  $\pm 30^\circ$  según el patrón definido en la figura 5.14 para los dos planos de propagación, considerando las dimensiones de la piscina definidas en la figura 5.12. Hay que tener en cuenta además que en esta prueba, debido a la direccionalidad del transductor, solo se añade un rebote adicional a la señal recibida provocado por la pared ubicada detrás del receptor. Adicionalmente, se asume un viento nulo y un valor para la relación señal-ruido de 12 dB.

Al igual que la prueba realizada en el entorno anterior, el sistema de adquisición normaliza la señal para su almacenamiento, por lo que se ha optado por normalizar a su vez los valores de las señales de correlación obtenidas. Estas señales de correlación se representan en la figura 5.15, donde se muestra la señal de correlación real (a) y la señal de correlación sintética (b).

Tanto en la figura 5.15 (a) como (b), se puede apreciar una primera llegada seguida de varias otras de menor energía, y a continuación el pico de mayor energía, siendo el instante de esta llegada más energética predicho correctamente por el modelo.

En relación a los resultados obtenidos en el entorno 1 (figura 5.10), se puede apreciar como el modelo predice con más exactitud el patrón de multicamino presente en este entorno, al no tener tanta importancia en este caso el multicamino proveniente de las paredes laterales.

Para analizar los tiempos de vuelo se ha representado en la figura 5.16 el valor absoluto de esta señal de correlación  $|y(t)|$ . Esta representación se ha hecho en una ventana temporal cercana a la primera llegada, identificando aquellos picos cuya amplitud es mayor que el ruido de correlación.

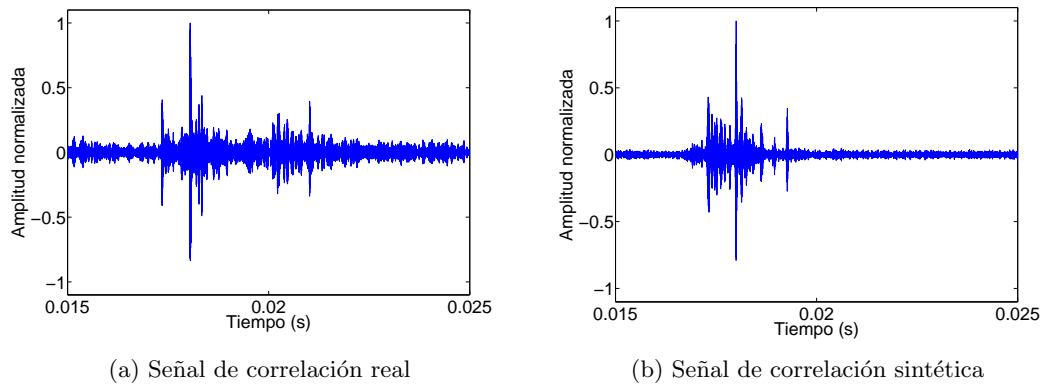


Figura 5.15: Correlaciones obtenidas en el entorno 2

Tal y como se puede observar en base a estos resultados, los tiempos de vuelo son muy parecidos para los picos obtenidos en ambas señales, con diferencias que oscilan entre  $1 \mu\text{s}$  y  $47 \mu\text{s}$ . Los tiempos de vuelo obtenidos para la señal real ( $TOF_{real}$ ) y sintética ( $TOF_{sin}$ ) de las diez primeras llegadas se han recogido en la tabla 5.3.

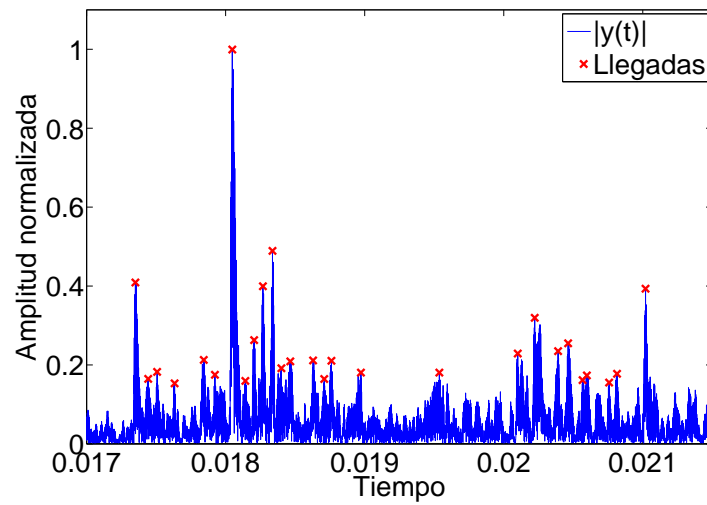
$TOF_{real}$ (ms)	$TOF_{sin}$ (ms)
	16.674
16.721	16.694
16.813	16.769
	16.839
16.877	16.889
	16.956
	16.984
17.003	17.009
	17.089
17.213	17.214

**Tabla 5.3:** Tiempos de vuelo detectados para las señales real y sintética en el entorno 2

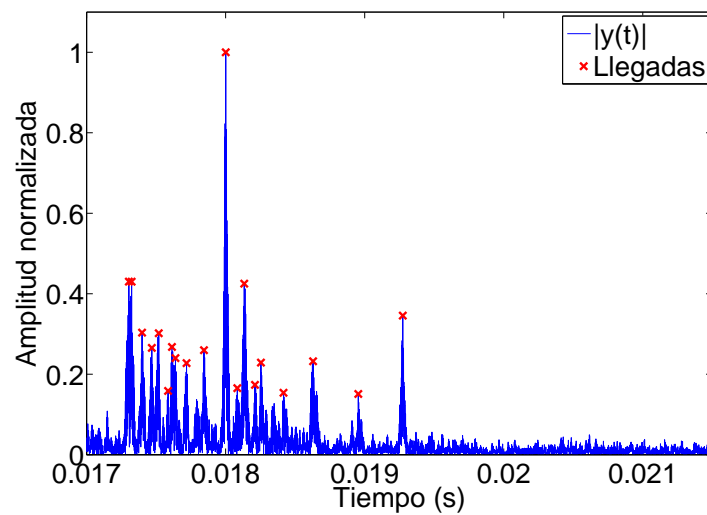
En base a los resultados obtenidos en ambos entornos, se puede concluir que el modelo de propagación describe con suficiente exactitud la propagación acústica que está teniendo lugar en el medio, especialmente cuando los efectos de las paredes laterales no son importantes, como es el caso del entorno 2. Los tiempos de vuelo, así como las amplitudes normalizadas obtenidas, muestran buena concordancia muy especialmente en este segundo entorno para los resultados obtenidos con el modelo.

También es capaz de predecir con una razonable exactitud los tiempos de vuelo de las primeras llegadas en un entorno tan complejo en lo que respecta a la propagación acústica como es el escenario 1, mostrando también que la llegada más energética no será la primera.





(a) Señal real



(b) Señal sintética

Figura 5.16: Valor absoluto de las señales de correlación para el entorno 2

### 5.1.3. Pruebas reales en entornos abiertos

Con la intención de comparar los resultados del modelo en un entorno real abierto, a continuación se muestra una comparativa de los resultados obtenidos por el modelo con los resultados de propagación obtenidos en una prueba en entornos de aguas poco profundas realizadas por Chitre en Singapur [Chi07], utilizando en el modelo los datos del entorno suministrados en este artículo.

En este experimento la distancia entre el emisor y el receptor es de 100 m, donde el emisor está sumergido a una profundidad de 3 m, y el receptor está sumergido 2 m. El

fondo se encuentra a una profundidad de 14.5 m, considerada constante a lo largo de toda la propagación, y presenta una densidad de  $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , que se corresponde con un fondo de barro. Se considera una densidad para el agua de  $1023 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , mientras que la velocidad del sonido tiene un valor de  $1539 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , considerada constante a lo largo de toda la columna de agua, dada la poca profundidad del entorno. Se ha tomado una densidad de 35 ‰ y un pH de 7. Por último, se ha considerado un valor de  $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para la velocidad del viento, puesto que genera unas pérdidas de transmisión cercanas a los 3 dB reportados en el trabajo, así como un valor constante de 10 dB/rebote para las pérdidas en el fondo para ajustarse a las consideradas en el artículo de Chitre.

En el modelo se usan estos datos de entrada y se lanzan 40 rayos entre  $\pm 17.5^\circ$ , dado que las dimensiones de este entorno permiten lanzar un número más reducido de rayos para describir correctamente la propagación, y ángulos mayores únicamente proporcionarían llegadas más atenuadas y retardadas en el tiempo, que acabarían siendo indistinguibles del fondo de ruido de la señal en el caso real.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.17, donde se representan los retardos y las pérdidas de transmisión relativas de las llegadas obtenidas por Chitre (cruces rojas), así como los retardos y pérdidas relativas obtenidas por el modelo (círculos azules). En esta comparativa se consideran retardos y pérdidas relativas puesto que los tiempos y pérdidas suministrados por Chitre en su trabajo están referidos a los de la primera llegada. Tal y como se observa en esta figura, el modelo predice los retardos y las pérdidas de transmisión con una razonable exactitud, con errores máximos de 0.14 ms para los retardos, y de 4.55 dB para las pérdidas relativas. Hay que resaltar que los valores proporcionados por Chitre tanto para los retardos como las pérdidas relativas hacen referencia a valores medios tras sucesivas medidas, debido a la naturaleza dinámica del canal, mientras que en el modelo solo se ha considerado un caso.

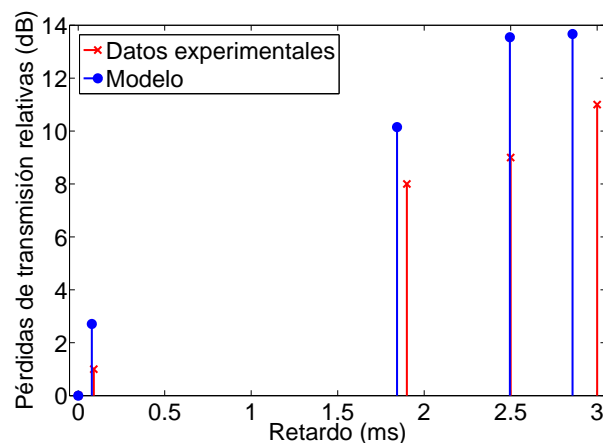


Figura 5.17: Tiempos de vuelo y pérdidas de transmisión obtenidas por el modelo, comparadas con datos reales obtenidos por Chitre [Chi07]

Estos resultados ratifican el buen funcionamiento del modelo de propagación en entornos abiertos, obteniendo una buena estimación del comportamiento del canal en cuanto al número de llegadas, sus retardos y las pérdidas de transmisión. Las diferencias pueden deberse a las propias incertidumbres en los parámetros del canal, así como a la propia naturaleza dinámica del canal no considerada en esta comparación.

## 5.2. Comparativa de los esquemas de codificación estudiados: CSS y Kasami

Una vez que se ha validado el modelo de propagación, en esta sección se van a comparar los dos esquemas de codificación estudiados en esta tesis: Conjuntos de Secuencias Complementarias (CSS) y secuencias Kasami. El objetivo es comprobar qué esquema de codificación es más robusto frente a los efectos típicos que distorsionan las señales acústicas en entornos subacuáticos, como son el multicamino, la atenuación de la señal, la distorsión generada por el viento, que provocará un ensanchamiento Doppler en la señal reflejada y desvanecimiento, y por último la resistencia a ISI, MAI y efecto cerca-lejos.

Para realizar este estudio se ha empleado el modelo de propagación desarrollado en esta tesis. Se ha considerado un entorno tipo de aguas muy poco profundas, tal y como se representa en la figura 5.18. Este fondo se asume que es arenoso, con una densidad de  $1941 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y una velocidad del sonido de  $1749 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Por su parte, se asume una densidad para el agua de  $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , además de un valor de salinidad de  $33.4 \text{ ‰}$  y un pH de 7 para toda la columna de agua, valores que se pueden encontrar de forma habitual en el medio [JKPS11]. Por último, se considera un valor para la temperatura de la columna de agua de  $13.1^\circ\text{C}$ , que se ha tomado del *World Ocean Database 2009* [Cen09] para condiciones estivales y latitudes medias, en torno a  $45^\circ$ . La elección de un entorno de aguas muy poco profundas viene dada por considerar un medio hostil para la propagación de señales acústicas debido al elevado multicamino que estará presente en la señal recibida, de manera que se pueda evaluar el desempeño de estos códigos en entornos desfavorables, asumiendo por tanto que los resultados obtenidos en entornos más favorables será mejor para ambos casos.

Los códigos se emiten modulados en BPSK a una frecuencia de 30 kHz. En lo que respecta a los CSS, se ha considerado un código de 256 bits, formado por el entrelazado de cuatro secuencias de longitud 64. Y en lo que respecta a las secuencias Kasami, se ha escogido un código de 255 bits de longitud. Estudios previos realizados en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá han permitido acotar la búsqueda de longitudes ideales de código a estos valores, puesto que presentan buenas propiedades de correlación y además la duración de su emisión es más corta en comparación con longitudes de 1023-1024 bits, lo que originaría mayores tiempos de proceso, a la vez que no es tan corta como para estar más sujeta a los efectos del canal que ocasionen pérdidas de bits, como las longitudes de 63-64 bits [Pér09].

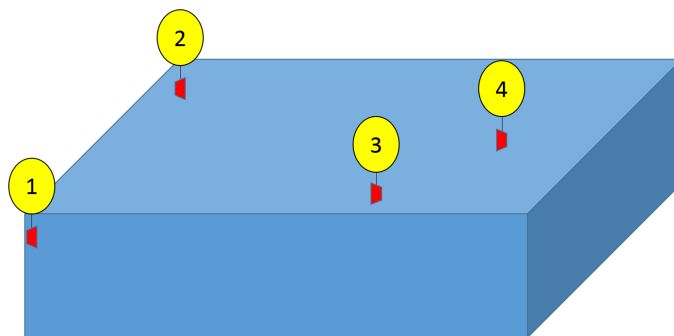


Figura 5.18: Entorno tipo considerado para la comparativa de los códigos CSS y Kasami

Para la emisión y recepción de los códigos se ha considerado un sistema de posicionamiento relativo que opera en la superficie del mar. Este sistema consta de cuatro boyas ancladas en posiciones fijas, recogidas en la tabla 5.4, de manera que los dos esquemas de codificación se puedan comparar bajo las mismas condiciones. El sistema se basa en la emisión y recepción de señales mediante tiempos de ida y vuelta [AJI<sup>+</sup>12] empleando para ello transductores acústicos sumergidos a 1 m de profundidad. Este esquema de tiempos de ida y vuelta permite calcular las distancias entre cada par de nodos, asumiendo un valor para la velocidad del sonido, que se ha calculado a la profundidad del emisor,  $z_e$ . Una vez conocidas las distancias entre todos los nodos, se aplica el algoritmo MDS para calcular la posición de todos los nodos del sistema.

Además del efecto de la diferente atenuación sufrida por cada código que viene determinada por las distancias entre los distintos nodos, en este estudio se han considerado cuatro valores de viento diferentes, que representan condiciones desde un viento despreciable ( $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a una velocidad considerable ( $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Estos valores se pueden encontrar fácilmente en entornos reales. Así mismo, se han considerado tres niveles diferentes de relación señal-ruido (-9, 0 y 9 dB), representando desde una situación desfavorable a otra favorable, donde este ruido es ruido blanco Gaussiano.

Dada la naturaleza estadística de los efectos introducidos por el ruido y el viento, se han considerado cien simulaciones para cada combinación de valores de viento y ruido y para cada esquema de codificación. Hay que hacer notar además que aunque el viento es una fuente de ruido, tal y como se definió en la sección 3.4, en este estudio se asume que son efectos no relacionados entre sí debido a la frecuencia de la señal emitida, que está fuera de la influencia del ruido introducido por el viento. Los parámetros más relevantes para este estudio se han recogido en la tabla 5.4.

La figura de mérito considerada en este estudio es la comparativa del error en la posición ( $\Delta_i$ ) obtenido por el algoritmo MDS para los nodos superficiales, donde este error se calcula según (5.1):

$$\Delta_i = \sqrt{(x_{real} - x_{estimada_i})^2 + (y_{real} - y_{estimada_i})^2} \quad (5.1)$$

Variable	Valores
Posiciones (m)	(0,0), (0,600), (250,250), (450,350)
Frecuencia de portadora (kHz)	30
Viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.3, 2, 4 y 6
SNR (dB)	-9, 0 y 9

**Tabla 5.4:** Datos considerados en estudio comparativo de códigos CSS y Kasami

donde  $i = 1, \dots, 100$ . Una vez que se obtienen las cien medidas para cada combinación de viento y ruido, se calcula el valor medio del error en la posición para esa combinación en particular y código empleado.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.19 (a) para los CSS, y en la figura 5.19 (b) para las secuencias Kasami, donde se han representado en diferente color los errores para cada uno de los nodos superficiales. En esta figura no aparece el primer nodo, ya que es el origen del sistema y la posición obtenida por el algoritmo será siempre (0,0) m. Se muestran los errores cometidos para los distintos valores de viento y ruido considerados, donde hay que resaltar además que las escalas empleadas para cuantificar el error (eje Y de cada figura) son diferentes.

Se puede observar en estos resultados cómo el error medio obtenido con los CSS es considerablemente mayor que utilizando códigos Kasami: al menos en un orden de magnitud superior. Esta diferencia se debe fundamentalmente a la mayor detección de datos espurios como picos de correlación válidos usando CSS, debido a la cercanía de los nodos tres y cuatro en relación a los otros dos (efecto cerca-lejos). Estos datos espurios proporcionan distancias que pueden diferir en algún centenar de metros respecto a la real, ocasionando que el algoritmo obtenga una posición que puede estar equivocada respecto a la real hasta cerca de 200 m.

No se pueden observar las consecuencias de los distintos efectos considerados en la figura 5.19 (a) puesto que el error debido a los datos espurios enmascara al resto, pero sí se pueden estudiar éstos en la figura 5.19 (b). En este caso se puede observar en primer lugar cómo los errores son menores a medida que aumenta el viento. Esto se debe a la destrucción del multicamino debido a una mayor pérdida de energía de las señales que rebotan en la superficie del mar, según se detalló en la sección 3.2.3. A menor multicamino la detección del código se vuelve más fiable puesto que hay menos interferencia, ocasionando menos estimaciones erróneas. El efecto del viento (y por tanto del multicamino) predomina a valores bajos sobre el efecto del ruido. Éste únicamente adquiere especial relevancia, para los valores de ruido considerados, cuando además el viento es bajo, sumándose su efecto destructivo al del elevado multicamino. Cuando el multicamino no es importante (vientos de 4 y 6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), el efecto del ruido es prácticamente despreciable, como es de esperar de la

alta ganancia de proceso asociada al esquema de codificación propuesto.

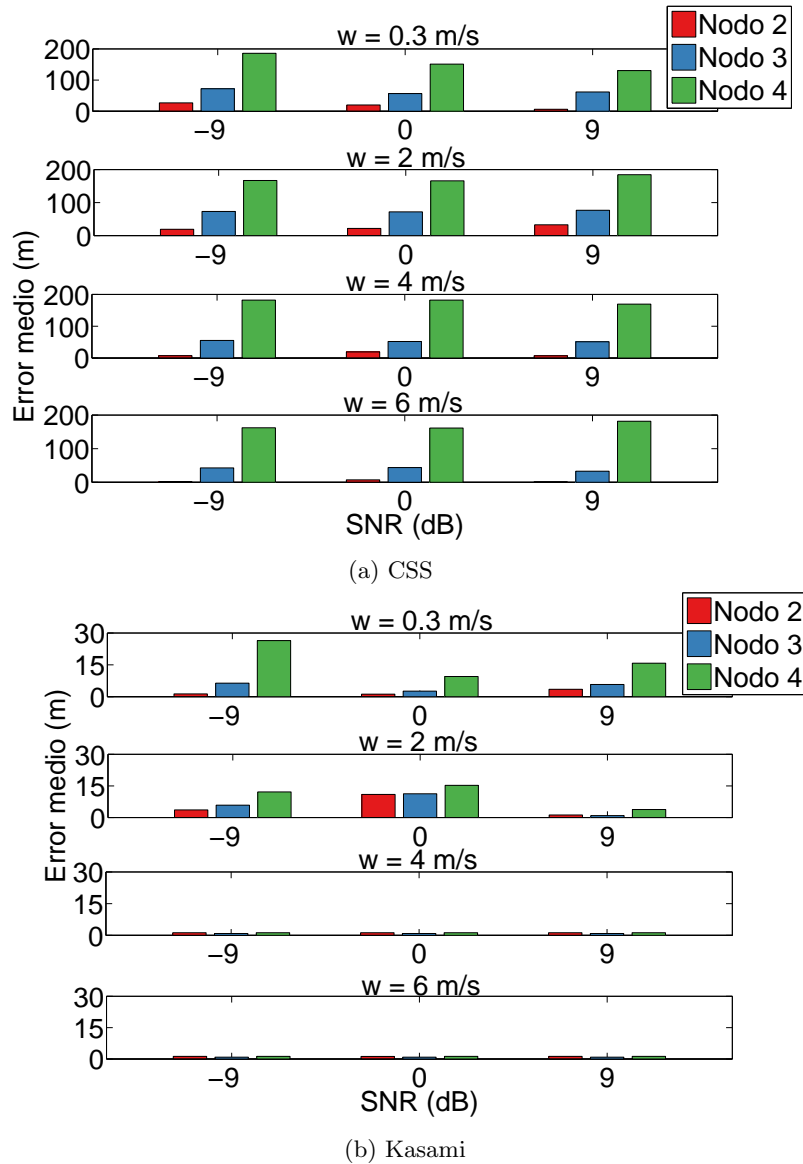


Figura 5.19: Errores medios en la posición para cada nodo obtenidos por el algoritmo MDS

Teniendo en cuenta estos resultados se puede concluir que los códigos Kasami presentan mayor robustez que los códigos CSS frente al ruido, viento y muy especialmente MAI y efecto cerca-lejos, entendiéndose robustez como mayor tolerancia a estos efectos. El motivo de este resultado parece estar en la pérdida de las propiedades ideales de los códigos CSS al formar la macrosecuencia, entre ellas la de ortogonalidad entre distintos códigos de la familia. Esta pérdida de idealidad ya ha sido observada anteriormente en un sistema aéreo como consecuencia del efecto de las turbulencias [IUM<sup>+</sup>06]. En base a estos resultados, se han seleccionado los códigos Kasami para futuras pruebas y su implementación en el sistema de posicionamiento propuesto.

### 5.3. Influencia del canal subacuático en la estimación de distancias mediante códigos Kasami

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la estimación de distancias utilizando códigos Kasami. Para ello se ha realizado un estudio estadístico con el objetivo de comprobar cómo el viento en la superficie y el ruido blanco Gaussiano afectan a dicha estimación de distancias, sin incluir ningún algoritmo de posicionamiento y considerando además distintos canales de propagación.

Además de identificar qué efectos tendrán más influencia en esta estimación de distancias, es importante conocer también el orden de magnitud de estos errores, puesto que estos se propagarán luego a la estimación de la posición del nodo sumergido efectuada por el sistema de posicionamiento.

Para realizar este estudio se ha utilizado el modelo de propagación desarrollado. Para ello se consideran dos transductores sincronizados, uno actuando como emisor y otro como receptor, sumergidos a una profundidad de  $z_e = 2$  m. La distancia entre las boyas,  $d$ , tomará distintos valores en el estudio entre 50 y 300 m, puesto que éste será el rango de distancias entre los nodos superficiales que se considerará luego en el sistema de posicionamiento.

El emisor transmite un código Kasami de 255 bits, modulado en BPSK a 27 kHz, que se propaga por el canal subacuático llegando al receptor tras un determinado tiempo, que dependerá de la distancia entre ambas boyas. En el receptor se aplica un filtro acoplado al código transmitido y un detector de picos [Yod13], lo que permitirá identificar los tiempos de vuelo,  $t_{TDV}$ . Para calcular la distancia es necesario conocer un valor de velocidad del sonido, que se calculará para la profundidad del emisor,  $c(z_e)$ , así como la duración del código emitido  $t_{code}$ . De esta manera, se podrá calcular la distancia entre ambos transductores según (5.2). Esta configuración se representa en la figura 5.20.

$$d = (t_{TDV} - t_{code}) \cdot c(z_e) \quad (5.2)$$

Nuevamente, el análisis de los distintos efectos se realiza a través del error  $\Delta_i$  entre la distancia real entre los transductores y la proporcionada por la detección del código Kasami, es decir

$$\Delta_i = |d_{real} - d_{estimada_i}| \quad (5.3)$$

done  $i = 1, \dots, 900$ . Este estudio se repite para todas las combinaciones posibles de ruido, viento y distancias entre las boyas, realizando 900 repeticiones para cada combinación de estas variables, obteniendo el error medio y la desviación típica en la estimación de la distancia para cada combinación de valores. En cada una de las 900 repeticiones se lanzan 700 rayos entre  $\pm 37^\circ$ , considerando una densidad del agua de  $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , un fondo arenoso con una densidad de  $1941 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , una velocidad del sonido de  $1749 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , y una salinidad

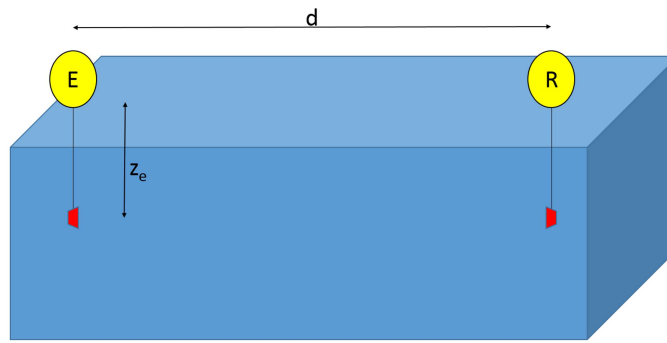


Figura 5.20: Configuración del emisor y receptor para el estudio de errores en la distancia mediante códigos Kasami

de 0 ‰, representando estos valores un entorno tipo de propagación. Los valores de viento, ruido y distancias incluidos en el estudio se recogen a su vez en la tabla 5.5, y representan condiciones típicas que se pueden encontrar en un canal subacuático.

Variable	Valores
Distancias (m)	50, 100, 150, 200, 250 y 300
Viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1, 2, 3, 4 y 5
SNR (dB)	90, 12, 6, 0, -6 y -12

**Tabla 5.5:** Datos considerados en el estudio de estimación de distancias mediante códigos Kasami

Adicionalmente, como la estimación de la distancia entre las boyas depende del valor de velocidad del sonido tal y como indica la ecuación (5.2), se han considerado también tres canales subacuáticos diferentes: un entorno de aguas poco profundas, donde la velocidad del sonido es constante, y un canal superficial y un canal acústico profundo, con velocidades del sonido no constantes. El estudio estadístico se ha realizado, por tanto, para cada uno de los tres entornos considerados, pudiendo comprobar así el efecto que tiene la suposición de valor constante para la velocidad del sonido en la estimación de distancias. Además, las condiciones de multicamino en los tres entornos son diferentes, puesto que la profundidad del fondo considerada para cada caso es distinta, reflejando así en el estudio diversos entornos realistas según sus características. A continuación se van a presentar los resultados para cada uno de los casos considerados.

### 5.3.1. Aguas poco profundas

En este caso se considera que el fondo está a una profundidad de 20 m, y se tiene una temperatura de 12°C para toda la columna de agua, lo que proporciona un valor constante de velocidad del sonido igual a  $1455 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



La figura 5.21 muestra los errores medios en la estimación de distancias para todas las combinaciones de ruido, viento y distancia entre boyas, mientras que la figura 5.22 muestra las desviaciones típicas obtenidas. Se puede observar que para distancias de 50 m el error medio cometido es muy bajo para todas las combinaciones de viento y ruido, y que esta estimación además presenta poca dispersión. El mayor error obtenido en este caso es de 5.9 cm, y la mayor dispersión de 7.6 cm. A esta distancia la influencia de los distintos efectos es muy baja, puesto que habrá menos multicamino al estar el receptor cerca del emisor, y ser los tiempos de vuelo de todos los caminos recibidos bastante parecidos, lo que provoca poco error al seleccionar el detector de picos un camino distinto al directo.

A una distancia de 100 m los errores medios siguen siendo bajos para la mayoría de combinaciones de ruido y viento estudiadas, presentando el mismo orden de magnitud que para 50 m. Sin embargo, sí se aprecia una mayor dispersión de valores para un viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , así como para un ruido de -12 dB, aumentando desde los 5 mm hasta 49 cm. Esta situación es especialmente crítica cuando se tiene un viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y un ruido de -12 dB simultáneamente, provocando un aumento del error medio a un valor de 67 cm, con una desviación típica de 2.03 m. Este resultado indica que en este caso, la presencia de multicamino, que es importante puesto que hay poco viento, sumada al efecto de un ruido considerable, provoca un mayor número de estimaciones erróneas en la detección del pico de correlación. Para el resto de valores de ruido y vientos mayores estos efectos no son significativos en la estimación de la distancia.

Cuando la distancia es de 150 m se obtienen los peores valores para la estimación de distancias, tanto en el error medio como en la desviación típica. El comportamiento con el ruido y el viento es análogo al caso anterior, aunque ahora el error medio sí se ve más influenciado por estos efectos, especialmente por el viento, lo que indica que a esta distancia debe existir un multicamino muy importante que provoca la degradación del código original, dificultando su correcta estimación para valores bajos de viento. La dispersión de los valores obtenidos es también mayor, lo que indica la influencia de estos efectos aleatorios en la estimación de la distancia a 150 m. El error medio oscila entre los 5.7 cm y los 0.93 m, alcanzando el valor máximo para la combinación de viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y ruido de -12 dB, presentando un valor de 1.64 m, con una desviación típica de 2.14 m. En el resto de casos oscila entre los 34 cm y los 1.73 m.

Los resultados para distancias de 200, 250 y 300 m son muy parecidos entre sí y análogos a los obtenidos anteriormente, aunque los errores medios y las desviaciones típicas son inferiores a los obtenidos para una distancia de 150 m. Para 200 m se obtienen errores entre 3.5 cm y 1.05 m, con desviaciones típicas comprendidas entre 10.7 cm y 1.99 m, mientras que para 250 m se obtienen errores entre 7.8 mm y 1 m, con desviaciones típicas entre 1.3 cm y 2.02 m. Por su parte, para 300 m se obtienen errores entre 6.2 mm y 0.72 cm, con desviaciones típicas entre 1.6 mm y 1.6 m. Nuevamente los mayores errores y desviaciones típicas se obtienen con la combinación de viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y ruido de -12 dB, mostrando estimaciones muy exactas en la mayoría del resto de situaciones, especialmente cuando el

viento es mayor de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

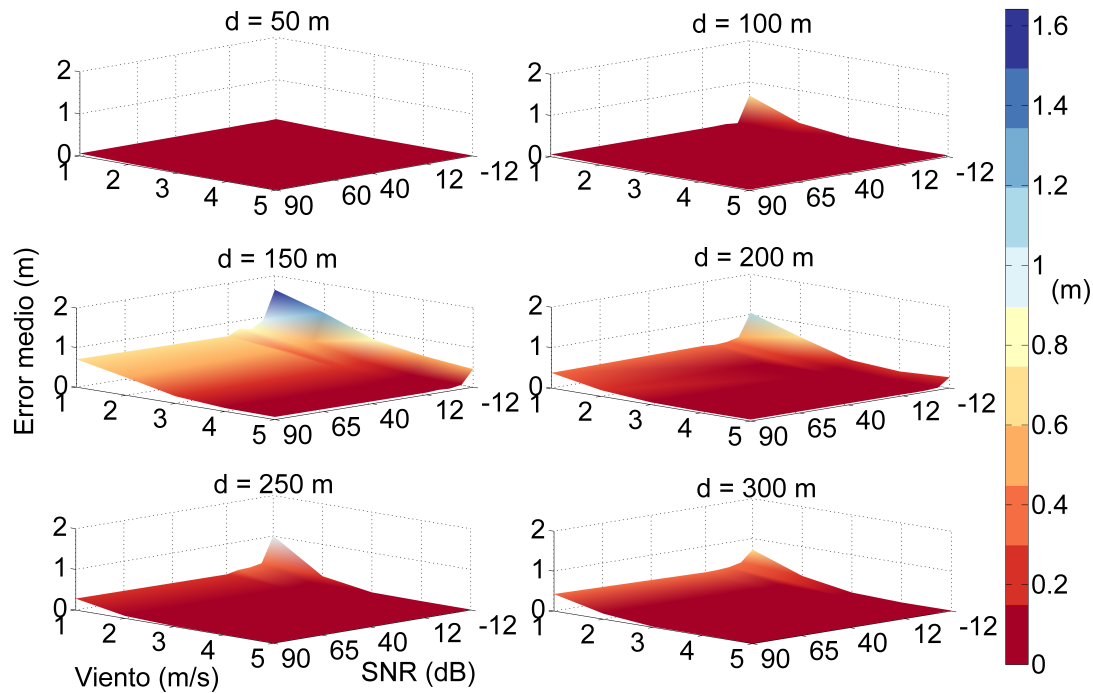


Figura 5.21: Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en entornos de aguas poco profundas

Estos resultados muestran en primer lugar que el efecto del viento, y por tanto la influencia del multicamino en entornos de aguas poco profundas, se hace notar especialmente cuando aumenta la distancia, puesto que habrá más llegadas en el receptor provenientes de otros caminos distintos al directo. Cuando existe una componente de multicamino importante, ésta afecta especialmente a la estimación de la distancia entre los dos nodos cuando hay un viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , es decir, hay poco viento y la superficie del mar está prácticamente en calma. A medida que aumenta la velocidad del viento y por tanto los rebotes en la superficie se ven más atenuados, la señal recibida presenta un multicamino menor y por tanto la estimación es más fiable, mostrando errores y dispersiones menores, del orden de centímetros o pocas decenas de centímetros, tal y como se ha comentado anteriormente. El ruido no parece afectar a la estimación, al menos en los valores considerados, excepto para un valor de  $-12 \text{ dB}$ , y especialmente cuando se combina este efecto con un viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , siendo su efecto para el resto de casos despreciable gracias a la codificación empleada.

### 5.3.2. Canal superficial

Se considera ahora un entorno en el que el perfil de velocidad del sonido es el mostrado en la figura 5.23, habilitando la presencia de un canal superficial tal y como se detalló en la

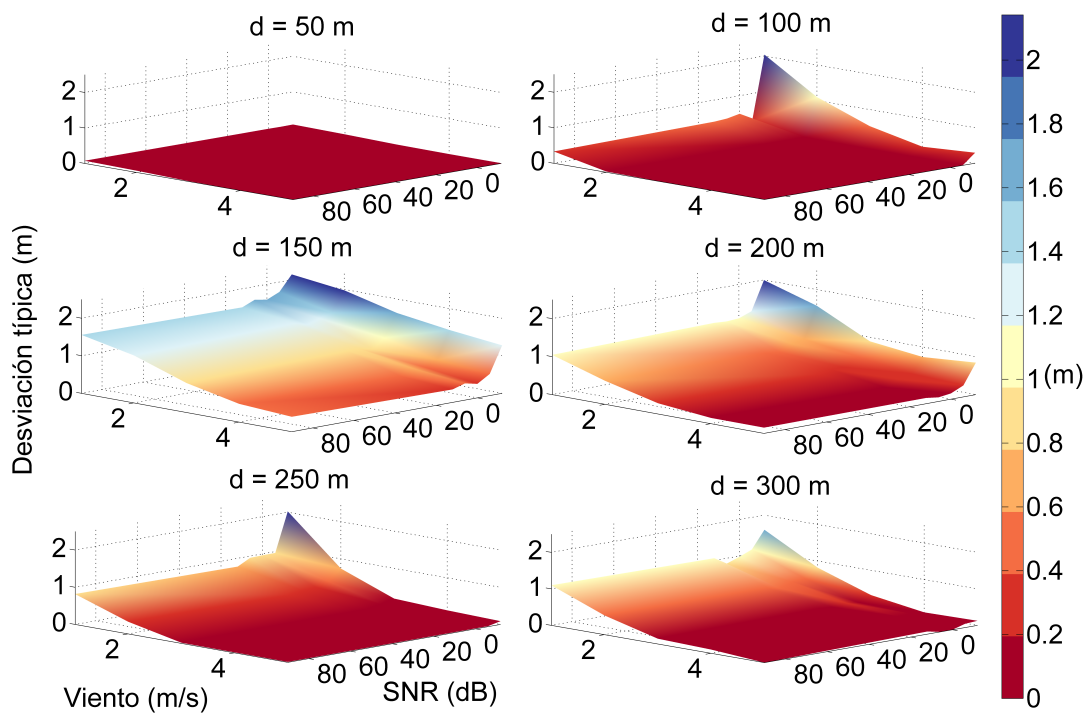


Figura 5.22: Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en entornos de aguas poco profundas

sección 3.1.1. El perfil considerado representaría un perfil típico para época invernal, donde la temperatura de la masa de agua cercana a la superficie está más fría debido a la influencia de la atmósfera. La profundidad ahora es de 100 m para reproducir un valor tipo acorde a estos canales, lo que reduce además la componente global del multicamino debido a la mayor distribución de llegadas a lo largo de toda la columna de agua.

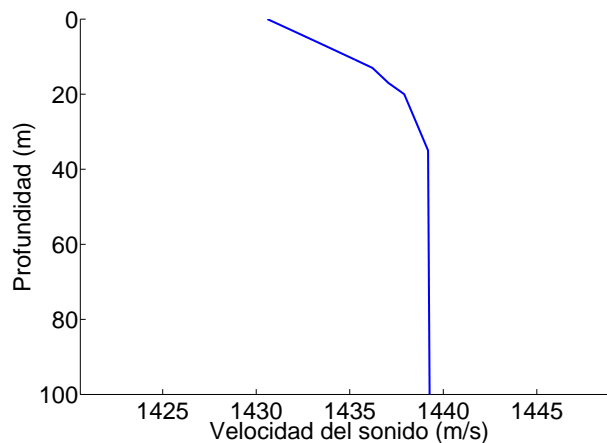


Figura 5.23: Perfil de velocidad del sonido considerado para la estimación de distancias en un canal superficial

Los errores medios obtenidos en este caso se muestran en la figura 5.24, mientras que las desviaciones típicas se representan en la figura 5.25. A diferencia de los resultados obtenidos en un entorno de aguas poco profundas, en un canal superficial se puede apreciar que los resultados presentan un error medio considerablemente menor, así como menor dispersión en los valores obtenidos.

La desviación típica oscila desde un valor de 0.2 mm o incluso 0, a un valor máximo de 36.9 cm, que se obtiene para una distancia de 250 m bajo un viento de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y un ruido de -12 dB. Por lo general, la desviación típica está en el orden de milímetros, lo que indica que la estimación de la distancia se está haciendo con gran precisión. Por su parte, el error medio tampoco sufre grandes variaciones, aunque sí aumenta el error de manera constante desde los 6 mm, obtenidos a una distancia de 50 m, hasta los 9 cm que se obtienen para una distancia de 300 m. Este efecto parece deberse a la mayor interferencia de señales a estas distancias debido al canal superficial.

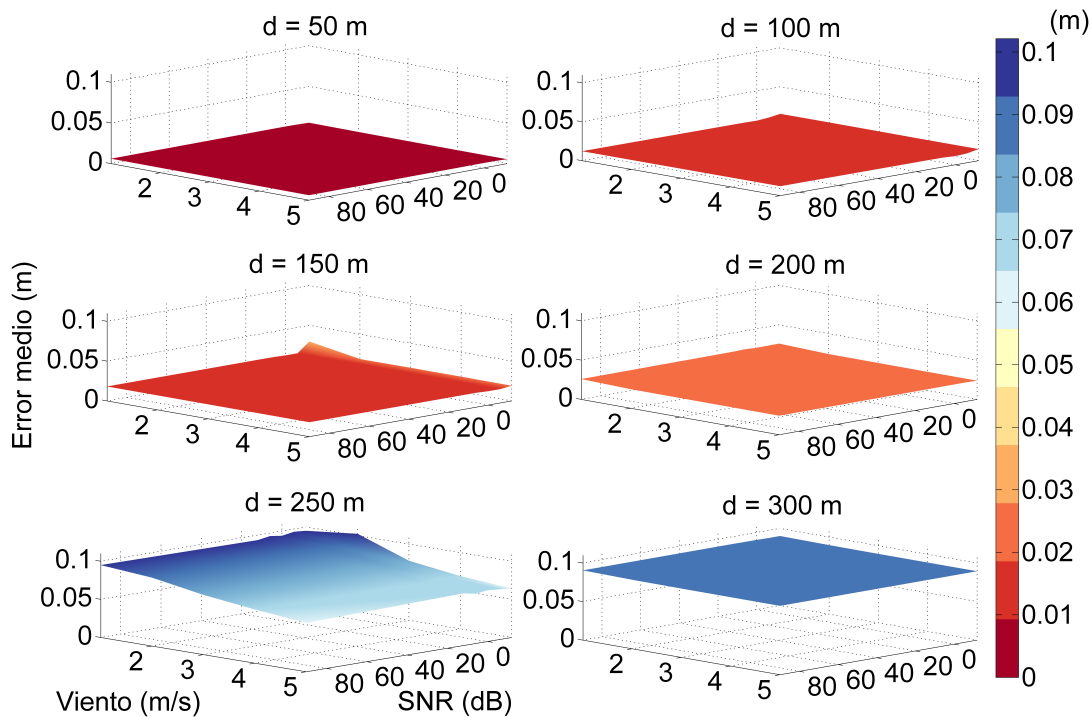


Figura 5.24: Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en un canal superficial

Los resultados obtenidos en este canal demuestran la gran influencia que tiene el multicamino sobre la degradación de la señal acústica. En este caso, al ser la profundidad cinco veces mayor que en el canal de aguas poco profundas, el multicamino obtenido en el receptor es menor, y por tanto aparece menos influencia en los resultados respecto al viento, mostrando éste un ligero efecto sobre la estimación a una distancia de 250 m.

El ruido tampoco afecta a la estimación de la señal, con la única excepción que se observa

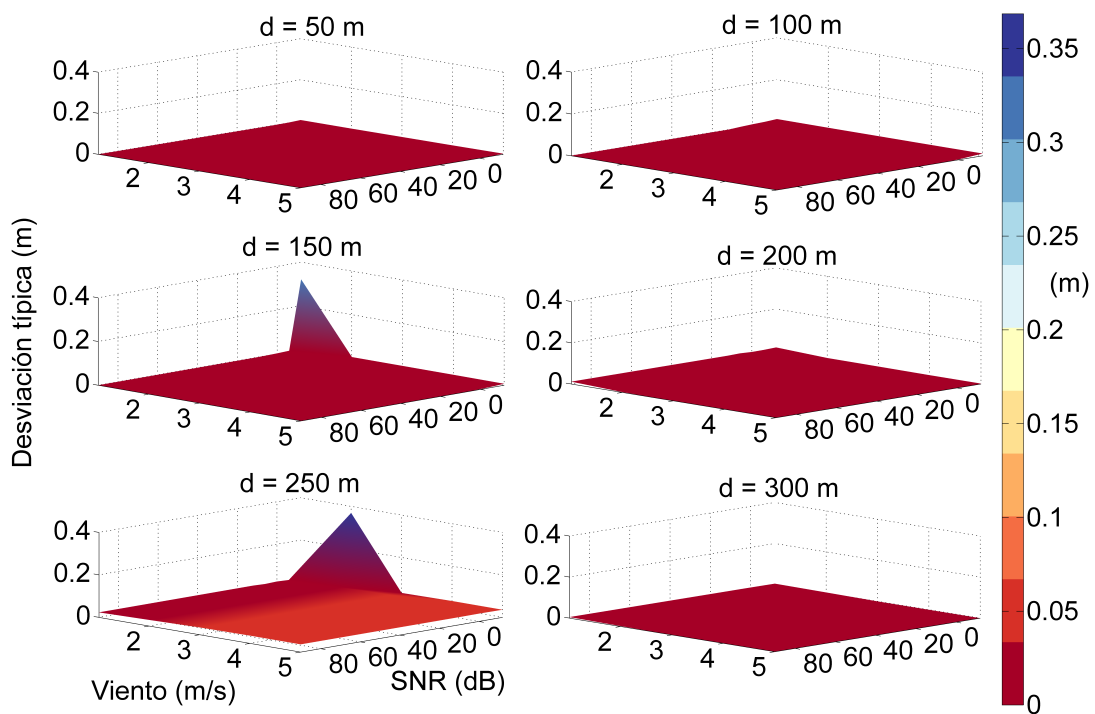


Figura 5.25: Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en un canal superficial

a una distancia de 150 m, donde aumenta ligeramente el error medio 1.2 cm respecto al resto de valores. Estos resultados muestran que el canal superficial es muy estable para la transmisión y detección de señales acústicas codificadas, obteniendo errores del orden de centímetros. Además, la suposición de un valor constante de la velocidad del sonido para el cálculo de la distancia no introduce un error apreciable a las distancias consideradas. Sin embargo, será un factor a tener en cuenta si las distancias entre los nodos son del orden de kilómetros, como puede ocurrir en el caso de sistemas LBL.

### 5.3.3. Canal acústico profundo

Se ha estudiado por último la detección de errores cuando existe un canal acústico profundo, tal y como indica el perfil de velocidad del sonido mostrado en la figura 5.26 y se detalló en la sección 3.1.1, aunque hay que resaltar que no se han ubicado los transductores dentro del canal, sino que se han dejado a la misma profundidad que en los casos anteriores. No obstante, es interesante considerar este entorno en el estudio ya que reflejaría las condiciones en alta mar, donde la velocidad del sonido tampoco es constante y puede sufrir grandes variaciones, y donde la profundidad es también elevada, por lo que la influencia del multicamino será prácticamente despreciable, ya que existirán menos rebotes que en el canal superficial.

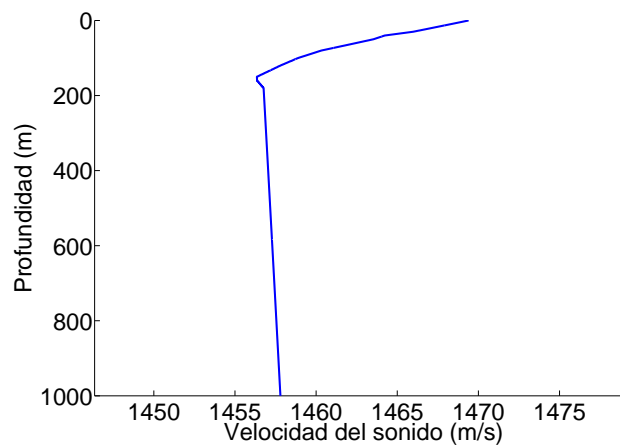


Figura 5.26: Perfil de velocidad del sonido considerado para la estimación de distancias en presencia de un canal acústico profundo

Los errores medios obtenidos en este caso se muestran en la figura 5.27, mientras que las desviaciones típicas se representan en la figura 5.28. Los resultados son muy parecidos a los obtenidos para un canal superficial, con errores medios presentados unos valores muy bajos, oscilando entre los 6.8 mm y los 4.5 cm, con unas desviaciones típicas también bajas, variando entre los 0.2 mm y los 48 cm. No obstante y salvo dos casos puntuales obtenidos con un viento de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y un ruido de  $-12 \text{ dB}$  para 50 m, y un viento de  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y un ruido de  $-12 \text{ dB}$  a 250 m, la desviación típica no es mayor de 6 cm para ningún caso. En lo que respecta a los errores, se aprecia una mayor influencia del viento a 50 m, indicando la influencia de alguna llegada con rebote en la superficie del mar. A esta distancia, el error disminuye desde un máximo de 3.5 cm para un viento de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y ruido de  $-12 \text{ dB}$  hasta un valor de 6.8 mm para vientos de 4 y  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . En el resto de situaciones el error medio es prácticamente constante variando entre 1.4 y 4.5 cm.

Estos resultados muestran que este entorno de aguas profundas con la presencia de un canal acústico profundo es también muy estable en lo que respecta a la detección de las señales acústicas codificadas introduciendo poco error en este proceso, siendo este error del orden de centímetros. La incertidumbre en el valor de la velocidad del sonido tampoco se muestra importante en este entorno para las distancias consideradas, aunque al igual que con el canal superficial será un factor a tener en cuenta si las distancias entre nodos es mayor que el kilómetro.

De manera global y considerando los resultados obtenidos en los tres canales estudiados, se puede afirmar que el multicamino es la principal causa de error en la estimación de distancias, tal y como demuestra la importancia que tiene en los resultados para el canal de aguas poco profundas, que es donde se obtienen los mayores errores medios y desviaciones típicas. Este efecto se ve atenuado por la profundidad del medio y por la velocidad del viento, que actúa como destructor de multicamino. En lo que respecta al ruido, para

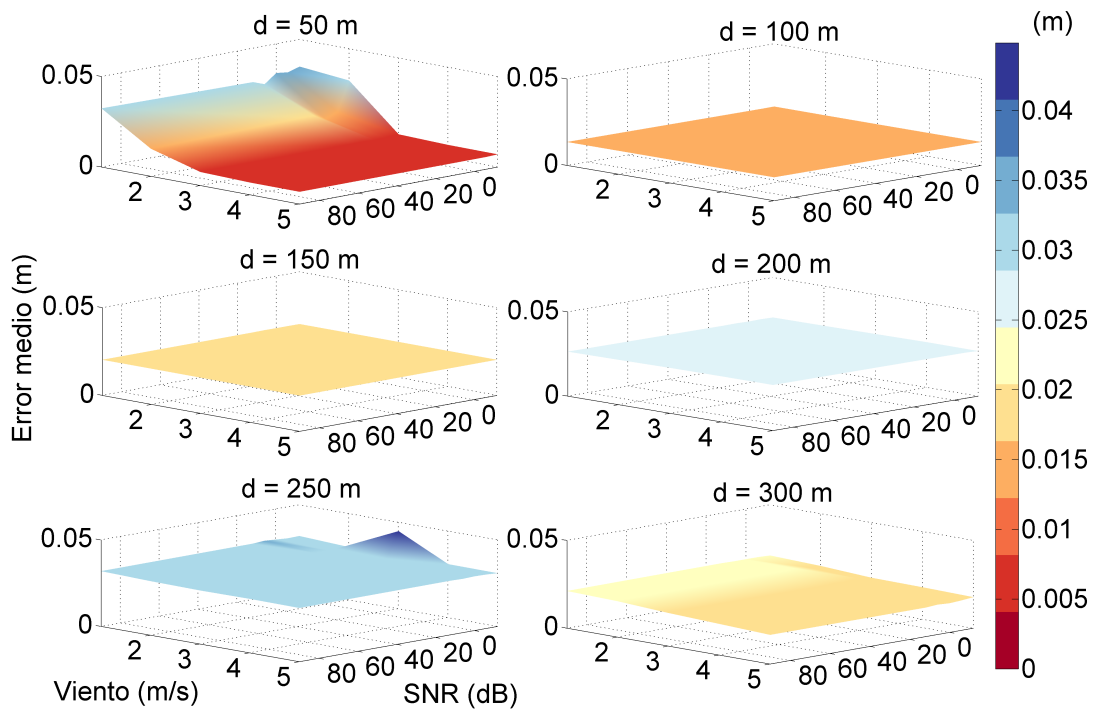


Figura 5.27: Errores medios en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en presencia de un canal acústico profundo

todos los casos estudiados se puede concluir que los valores considerados no afectan por lo general a la detección de la señal acústica, excepto cuando se combina con un multicamino importante, siendo ésta por lo general la situación que introduce más error en la detección. Salvo excepciones puntuales, los errores medios en la detección se encuentran siempre por debajo de medio metro, con situaciones en los que el error es del orden del centímetro, lo que muestra una estimación muy favorable en la mayoría de casos estudiados.

#### 5.4. Desempeño del sistema de posicionamiento propuesto

Una vez que se ha estudiado la influencia del canal subacuático en la estimación de distancias mediante códigos Kasami, se presentan en esta sección los resultados obtenidos por el sistema de posicionamiento empleando los algoritmos estudiados.

El sistema de posicionamiento consta de una serie de nodos superficiales desplegados en la superficie del mar, equipados con un receptor GPS y transductores acústicos, mientras que el nodo sumergido a localizar sólo necesita un transductor acústico que actúe tanto como emisor como receptor. Gracias al conocimiento de la posición de los nodos superficiales a través del GPS y al intercambio de señales acústicas codificadas, el nodo maestro puede calcular las coordenadas  $(x', y')$  del nodo sumergido aplicando cualquiera de los algoritmos de posicionamiento considerados. La profundidad  $z'$  del nodo sumergido se calcula en éste

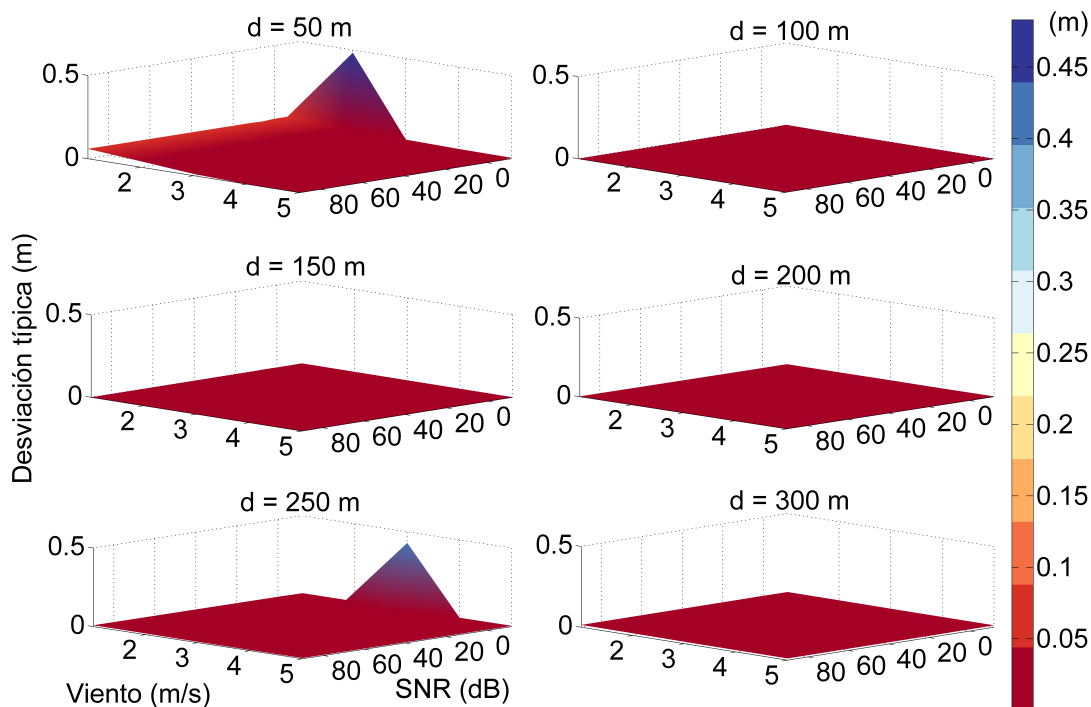


Figura 5.28: Desviación típica en la estimación de distancias empleando códigos Kasami en presencia de un canal acústico profundo

con un sensor de presión, y dicho valor se comunica al nodo maestro posteriormente.

Dadas las características del sistema propuesto, la posición estimada dependerá de la influencia de distintos efectos:

- Precisión del sensor de presión en el cálculo de la profundidad del nodo sumergido. Los algoritmos de trilateración esférica, Gauss-Newton y Cayley-Menger hacen uso del conocimiento de esta profundidad en sus cálculos, por lo que hay que comprobar cuánto afecta el error de este sensor en la estimación de la posición.
- Separación de los nodos superficiales y profundidad del nodo sumergido, puesto que la distinta distribución de los nodos origina una configuración geométrica diferente que repercute en el resultado final [Roa05].
- Número de nodos superficiales. El número mínimo de nodos en la superficie con posiciones conocidas para obtener la posición del nodo sumergido es tres. Incluir más nodos, además de influir en la configuración geométrica mencionada en el punto anterior, aporta información redundante al sistema que será aprovechada de distinta manera por los algoritmos de posicionamiento.
- Error en la estimación de la posición de los nodos superficiales ocasionada por la precisión del GPS. Este error se propagará hasta la posición estimada para el nodo



sumergido obtenida por los distintos algoritmos.

- Error en la estimación de distancias entre los nodos superficiales y el nodo sumergido mediante señales acústicas codificadas. Una mala estimación de las distancias repercutirá en una peor estimación de los algoritmos.
- Algoritmo de posicionamiento empleado.

Para estudiar cómo afecta la combinación de todos estos factores en la posición obtenida por los distintos algoritmos de posicionamiento se ha realizado un estudio estadístico considerando un entorno de  $800 \times 800 \text{ m}^2$  en el que se despliega el sistema.

A efectos de este estudio, el error en la posición del GPS se considera como un error Gaussiano de media cero con una desviación típica  $\sigma_{GPS}$ . El error en la estimación de distancias mediante señales codificadas se toma como un error Gaussiano con media  $\mu_{acu}$  y desviación típica  $\sigma_{acu}$ , donde los valores para la media y desviación típica se han tomado en virtud del estudio presentado en la sección 5.3. Este error en la estimación de distancias se aplica a cada transmisión acústica realizada por el sistema. Por su parte, el error en la estimación de la profundidad proporcionada por el sensor se considera como un error Gaussiano de media cero con una desviación típica  $\sigma_{Pres}$ .

Para simplificar el estudio, se considera que los distintos nodos superficiales están separados la misma distancia respecto al origen del sistema de posicionamiento, ubicado en el nodo maestro en posición  $(0,0,0) \text{ m}$ , y que todos están a la misma altura, en el plano  $z = 0 \text{ m}$ . Esta situación se representa en la figura 5.29, considerando cinco nodos, para una distancia respecto al origen de 300 m.

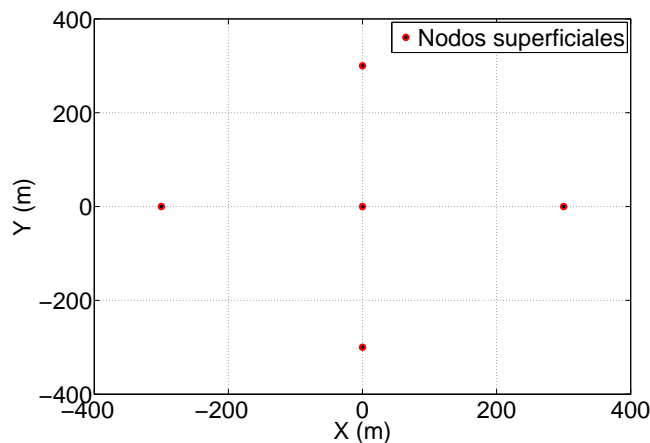


Figura 5.29: Despliegue de los nodos superficiales en el entorno

Para probar los distintos efectos en todo el entorno se ha realizado un mallado de entre 441 y 841 puntos, dependiendo si los nodos superficiales están separados 300 o 50 m respectivamente respecto al nodo maestro. En cada punto se realizan 100 repeticiones para

cada combinación de número de nodos, distancia entre ellos, error en el GPS, error acústico y profundidad del nodo sumergido, calculando la posición estimada  $(x', y')$  con cada uno de los cinco algoritmos considerados y calculando el error medio según (5.1) para cada algoritmo.

Los valores empleados en el estudio se han recogido en la tabla 5.6. A continuación se mostrarán los resultados más representativos obtenidos en este estudio mediante gráficas de funciones de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function*, CDF), que representan el porcentaje de medidas que se encuentran por debajo de una determinada variable, en este caso, el error medio en la posición. Por defecto, cuando se den valores de error en los resultados estos harán referencia a los obtenidos para el 95% de los casos.

Variable	Valores
Número de nodos superficiales	3, 4 y 5
Distancias entre los nodos (m)	50 y 300
$\sigma_{GPS}$ (m)	0, 0.30 y 3
$\mu_{acu}$ (m)	0.05 y 1
$\sigma_{acu}$ (m)	0.03 y 0.50
$\sigma_{Pres}$ (m)	0.15
Profundidad del nodo sumergido (m)	2, 4, 30 y 60

**Tabla 5.6:** Datos considerados en el estudio del funcionamiento del sistema de posicionamiento

#### 5.4.1. Efecto de la incertidumbre en el sensor de presión

Los sensores de presión se ven afectados por cierta incertidumbre en el cálculo de la profundidad, por lo que se ha comprobado cómo afecta un error habitual en estos sensores a las posiciones calculadas por los distintos algoritmos de posicionamiento, ya que los algoritmos de trilateración esférica, Cayley-Menger y Gauss-Newton hacen uso de esta información, como se ha mencionado anteriormente. Para hacer este estudio se ha considerado que en cada una de las iteraciones realizadas en cada punto del mallado, el nodo sumergido obtiene su profundidad mediante una nueva lectura del sensor, afectada por un ruido Gaussiano de media cero y desviación típica  $\sigma_{Pres} = 0.15$  m [Sea10, Val13].

Se han analizado a su vez dos casos: uno favorable (a), donde se consideran cinco nodos separados 300 m, y un error en la estimación acústica de media  $\mu_{acu} = 0.05$  m y desviación  $\sigma_{acu} = 0.03$  m; y otro desfavorable (b), donde se consideran tres nodos separados 50 m y un error en la estimación acústica de media  $\mu_{acu} = 1$  m y desviación  $\sigma_{acu} = 0.50$  m. En ambos casos, se asume que no hay error debido al GPS, de manera que no se enmascare el efecto del sensor de presión.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.30, donde se ha representado en (a) y (b) los dos casos mencionados anteriormente, mientras que (c) y (d) representan los resultados obtenidos en las mismas condiciones, considerando que no hay error en la estimación del sensor de profundidad, es decir, para  $\sigma_{Pres} = 0$  m.

Tal y como se puede apreciar en la figura 5.30, los resultados son prácticamente idénticos, lo que indica que este error en la estimación de la profundidad, en la magnitud que presenta, no se propaga de forma significativa a los algoritmos en los que se ha considerado su influencia. La única excepción es el algoritmo de Gauss-Newton para el caso desfavorable, que ahora presenta un dato espurio en la estimación de la posición. No obstante, los resultados al 95% de probabilidad no presentan variaciones reseñables, por lo que la influencia del sensor de presión no se considera en los estudios sucesivos.

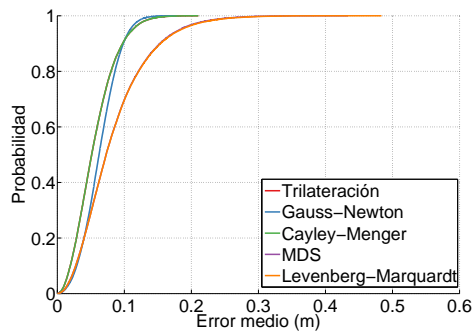
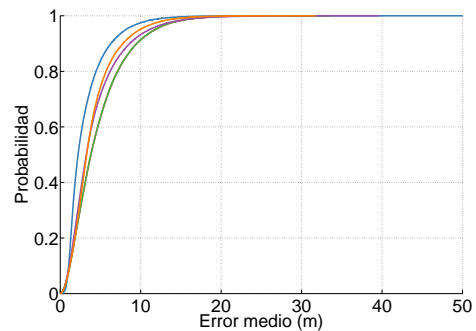
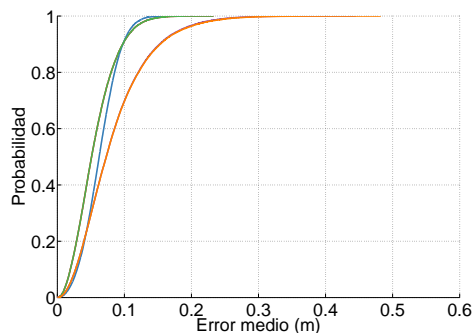
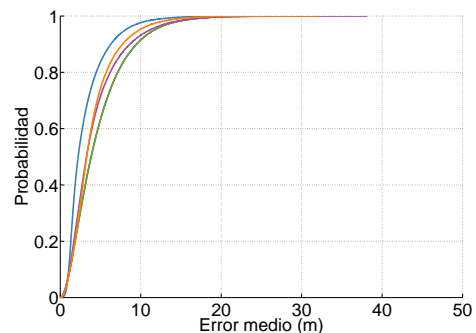
(a) Caso favorable, con  $\sigma_{Pres} = 0.15$  m(b) Caso desfavorable, con  $\sigma_{Pres} = 0.15$  m(c) Caso favorable, con  $\sigma_{Pres} = 0$  m(d) Caso desfavorable, con  $\sigma_{Pres} = 0$  m

Figura 5.30: CDF de la variación del error medio debido a la incertidumbre del sensor de presión para un caso favorable

#### 5.4.2. Influencia de la profundidad del nodo sumergido

Este estudio muestra la influencia de la profundidad del nodo sumergido en la posición final estimada por los distintos algoritmos, ya que dicha profundidad afectará a la configuración geométrica del sistema.

Los resultados para las cuatro profundidades consideradas en el estudio se muestran en

la figura 5.31, donde en la columna de la izquierda se han representando los resultados para el caso más favorable, que consiste en una distancia entre nodos de 300 m, un error acústico bajo, con  $\mu_{acu} = 0.05$  m y  $\sigma_{acu} = 0.03$  m,  $\sigma_{GPS} = 0$  m, y cinco nodos superficiales. En la columna de la derecha se han representado los resultados para el caso más desfavorable, que consiste en una distancia entre nodos de 50 m, un error acústico alto con  $\mu_{acu} = 1$  m y  $\sigma_{acu} = 0.50$  m,  $\sigma_{GPS} = 3$  m, y tres nodos superficiales.

Tal y como se puede apreciar en estos resultados la profundidad del nodo sumergido no afecta de manera significativa a la estimación de su posición en el nodo maestro, obteniendo prácticamente los mismos resultados para todos los casos favorables y todos los desfavorables entre sí. El error medio en el caso desfavorable es claramente superior al favorable, pero este estudio se abordará en la siguiente sección. Únicamente se aprecia un empeoramiento de los resultados para los algoritmos MDS y Levenberg-Marquardt en el caso favorable al pasar de 2 y 4 m a 30 y 60 m, obteniendo errores medios de 12 cm y 18 cm para el 95 % de las medidas, respectivamente. Los resultados obtenidos con el algoritmo de trilateración esférica se encuentran solapados con los obtenidos con Cayley-Menger.

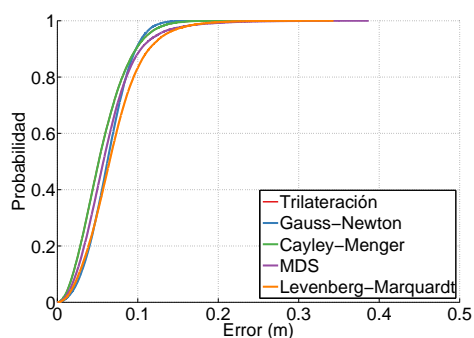
En base a estos resultados se puede concluir que la profundidad del nodo sumergido no afecta a la posición estimada por los algoritmos. Esto permitirá considerar en las siguientes secciones un único valor de profundidad para mostrar los resultados, sin que esto afecte a su interpretación.

### 5.4.3. Influencia del error en la estimación de distancias mediante señales acústicas y del número de nodos superficiales

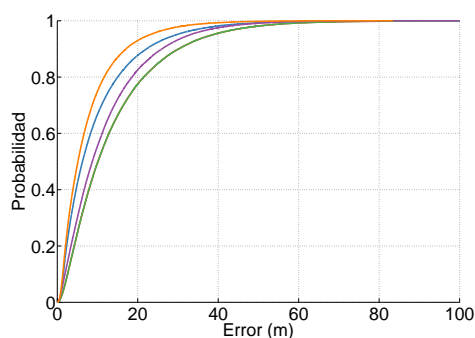
Para simplificar los resultados mostrados en este estudio, se van a considerar igualmente un caso favorable en la estimación de las distancias con  $\mu_{acu} = 0.05$  m y  $\sigma_{acu} = 0.03$  m, y un caso desfavorable con  $\mu_{acu} = 1$  m y  $\sigma_{acu} = 0.50$  m. Los resultados que se mostrarán a continuación son los obtenidos con una profundidad del nodo sumergido de 30 m, y para no introducir errores adicionales que puedan enmascarar la influencia de este efecto, se considera que el GPS tiene un error nulo, es decir,  $\sigma_{GPS} = 0$  m.

La figura 5.32 muestra los resultados obtenidos para una distancia entre nodos superficiales de 50 m, representando en la columna de la izquierda el caso favorable en la estimación acústica, y en la columna derecha, el desfavorable. En ambos casos se muestran además los resultados obtenidos cuando se consideran tres, cuatro y cinco nodos superficiales, de manera que se pueda comprobar también la influencia de estos.

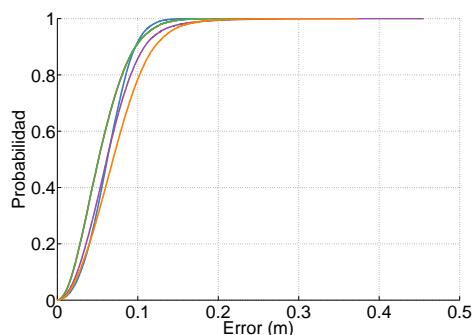
Según los resultados obtenidos, se aprecia que los errores aumentan desde los 48 cm hasta los 8 m para el algoritmo Gauss-Newton, o desde los aproximadamente 70 cm obtenidos con el resto de algoritmos hasta los 11.6 m obtenidos por Cayley-Menger, cuando se tienen tres nodos superficiales, debido al efecto de una medida acústica desfavorable. Cuando se tienen cinco nodos superficiales el comportamiento es análogo. En este caso, los errores aumentan



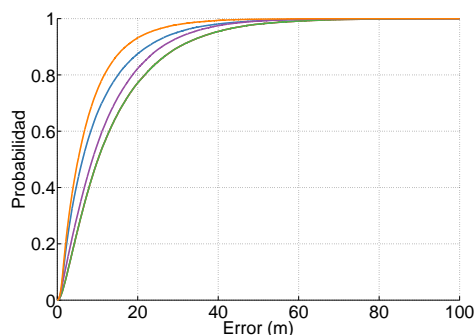
(a) Caso favorable,  $z = 2$  m



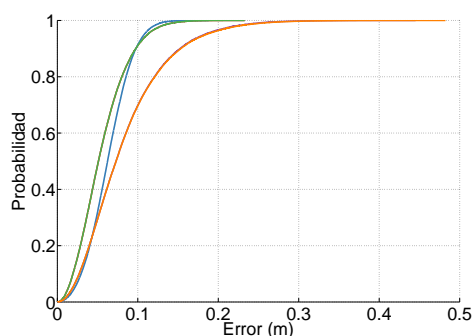
(b) Caso desfavorable,  $z = 2$  m



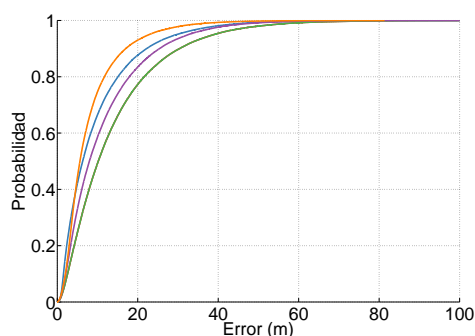
(c) Caso favorable,  $z = 4$  m



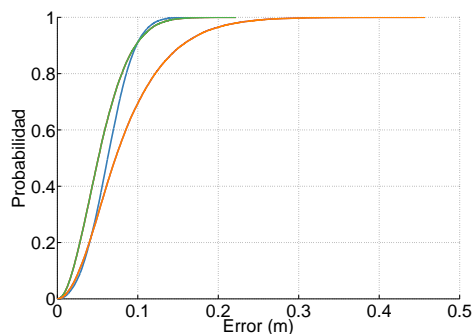
(d) Caso desfavorable,  $z = 4$  m



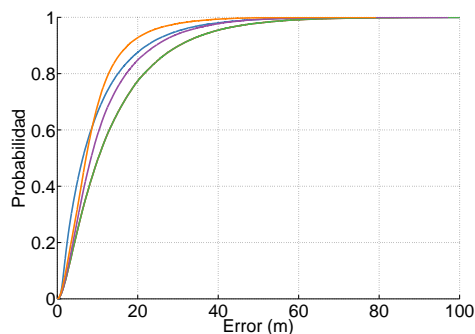
(e) Caso favorable,  $z = 30$  m



(f) Caso desfavorable,  $z = 30$  m



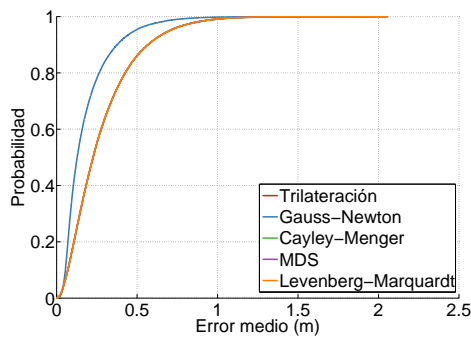
(g) Caso favorable,  $z = 60$  m



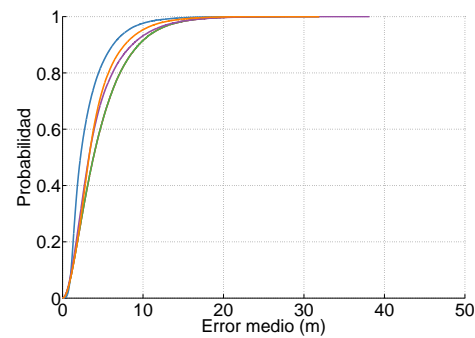
(h) Caso desfavorable,  $z = 60$  m

Figura 5.31: CDF de la variación del error medio con la profundidad del nodo sumergido

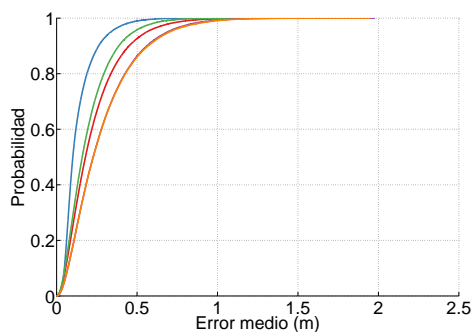
desde los 26 cm hasta los 4.5 m para el caso desfavorable en los resultados del algoritmo de Gauss-Newton, y desde los 68 cm hasta los 10.1 m para el algoritmo MDS.



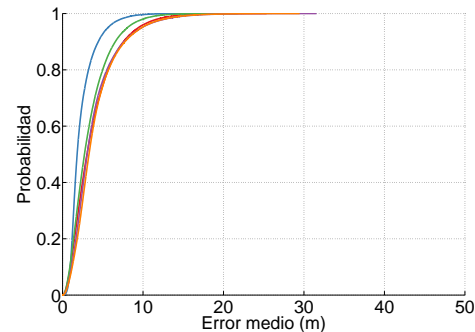
(a) Caso favorable, 3 nodos superficiales



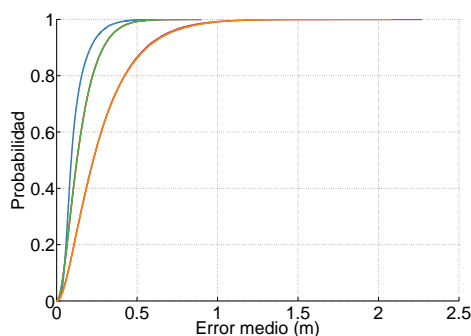
(b) Caso desfavorable, 3 nodos superficiales



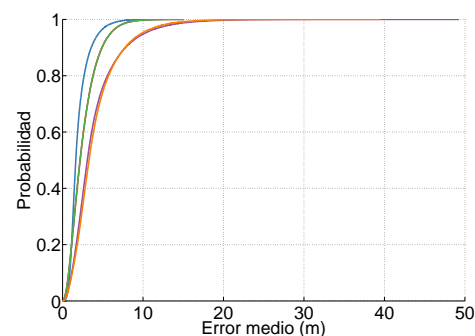
(c) Caso favorable, 4 nodos superficiales



(d) Caso desfavorable, 4 nodos superficiales



(e) Caso favorable, 5 nodos superficiales



(f) Caso desfavorable, 5 nodos superficiales

Figura 5.32: CDF de la variación del error medio con la estimación de distancia mediante señales acústicas para una separación de nodos superficiales de 50 m

Estos resultados reflejan el comportamiento esperado en el sistema, es decir, que para errores mayores en la detección de distancias, los distintos algoritmos de posicionamiento propagan dicho error obteniendo peores resultados. Este incremento del error medio es importante, ya que aumenta un orden de magnitud aproximadamente el error del sistema, pasando de decenas de centímetros a metros en este caso. Se puede apreciar también que aumentar el número de nodos superficiales aporta estimaciones más exactas para los algoritmos Gauss-Newton, Cayley-Menger y trilateración esférica (cuyos resultados se

muestran solapados con Cayley-Menger para los casos de tres y cinco nodos superficiales). Este comportamiento se debe al mejor aprovechamiento de la información redundante, llevado a cabo durante el proceso de minimización entre distancias medidas y estimadas que efectúa el algoritmo de Gauss-Newton, o ponderando las medidas obtenidas por distintos conjuntos de tripletas, como es el caso de los algoritmos de trilateración esférica y Cayley-Menger.

#### 5.4.4. Efecto de la distancia entre nodos superficiales

Para comprobar este efecto se va a repetir el estudio anterior, pero considerando ahora que los nodos superficiales se encuentran separados una distancia de 300 m respecto al nodo maestro. Estos resultados se muestran en las figuras 5.33 (a) y (b), donde igualmente se ha representado en la columna de la izquierda el caso favorable en la estimación acústica, y en la columna de la derecha, el desfavorable. En las figuras 5.33 (c) y (d) se muestran los resultados que se obtuvieron para una distancia de 50 m, para los casos favorable y desfavorable, respectivamente. Para simplificar la visualización de los resultados se van a mostrar únicamente aquellos obtenidos considerando tres nodos superficiales.

En estos resultados se puede apreciar claramente el efecto de separar los nodos superficiales. En el caso favorable, los errores oscilan entre los 13 cm para Gauss-Newton y los 18 cm para el resto de algoritmos, aumentando hasta los 2.3 m (Gauss-Newton) y 3.2 m (Cayley-Menger y trilateración esférica) en el caso desfavorable. Estos valores suponen una reducción de entre 6 y 8 m en el error medio para la situación en la que se obtiene una medida desfavorable en la estimación de distancias cuando los nodos están separados 50 m respecto al nodo maestro.

Con el objetivo de visualizar mejor la evolución de la reducción del error medio con la distancia entre los nodos superficiales y el nodo maestro, la figura 5.34 muestra los resultados para los algoritmos Gauss-Newton (columna de la izquierda) y MDS (columna de la derecha) para distancias de 50 a 300 m, con pasos intermedios de 50 m, para un caso favorable de estimación acústica de la distancia, y otro desfavorable, considerando ahora cinco nodos superficiales.

Tal y como se puede apreciar en esta figura, los errores tienden a disminuir notablemente a medida que se aumenta la distancia entre los nodos superficiales, hasta que se alcanza una distancia de 150 m. Para el algoritmo de Gauss-Newton la reducción del error medio es de 27 a 13 cm para la medida favorable, y de 4.5 a 2.2 m para el caso desfavorable. En el caso del algoritmo MDS, la reducción del error medio es de 68 a 30 cm para el caso desfavorable, y de 10.1 a 3.9 m para el caso desfavorable. Para una separación superior a los 150 m se sigue apreciando una ligera mejora, pero ésta no es tan significativa como para distancias inferiores a este valor.

Estos resultados indican que existe un límite para el máximo aumento de distancia

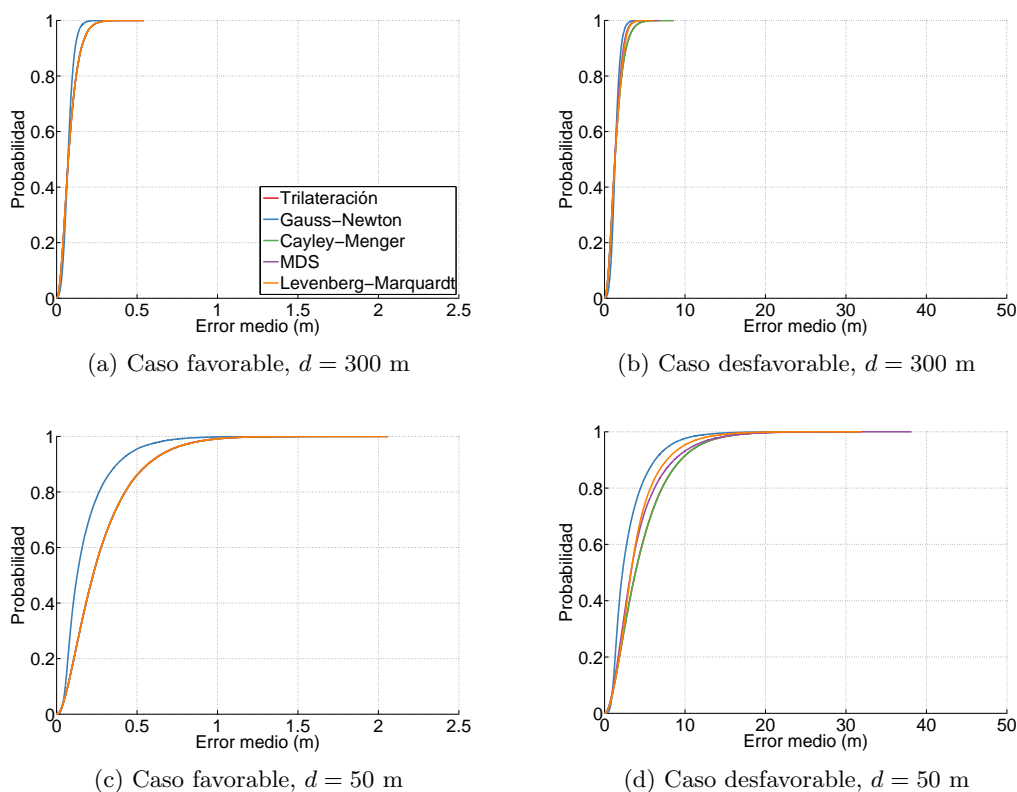


Figura 5.33: CDF de la variación del error medio con la distancia entre nodos superficiales

que permite mejorar los resultados de manera significativa, como cabía esperar. Si la separación entre los nodos superficiales es muy grande comparada con la profundidad del nodo sumergido, la configuración geométrica del sistema presentará un problema de dilución de precisión (*Dilution of Precision, DOP*) [Roa05]. En el caso concreto del sistema propuesto, cuyo funcionamiento se ha estudiado para distancias entre los nodos superficiales y el nodo maestro comprendidas entre 50 y 300 m, se puede afirmar que separar los nodos más de 150 m no aportará mejoras significativas al resultado final, más allá de reducir el error medio en pocos centímetros más. Esta conclusión es válida independientemente de si el sistema consta de tres o cinco nodos superficiales.

#### 5.4.5. Influencia del GPS

En este estudio se ha considerado que uno de los nodos superficiales está afectado por una mala estimación de su posición, obtenida por el GPS, que vendrá dada por una desviación típica  $\sigma_{GPS} = 0.3$  m ó  $\sigma_{GPS} = 3$  m [Mio11, Nat14].

Para los resultados que se exponen a continuación se ha considerado una estimación favorable de la distancia entre los nodos superficiales y sumergidos, con  $\mu_{acu} = 0.05$  m y  $\sigma_{acu} = 0.03$  m, así como una profundidad del nodo sumergido de 30 m. Se consideran a su vez tres nodos superficiales, con una distancia entre nodos de 50 m.



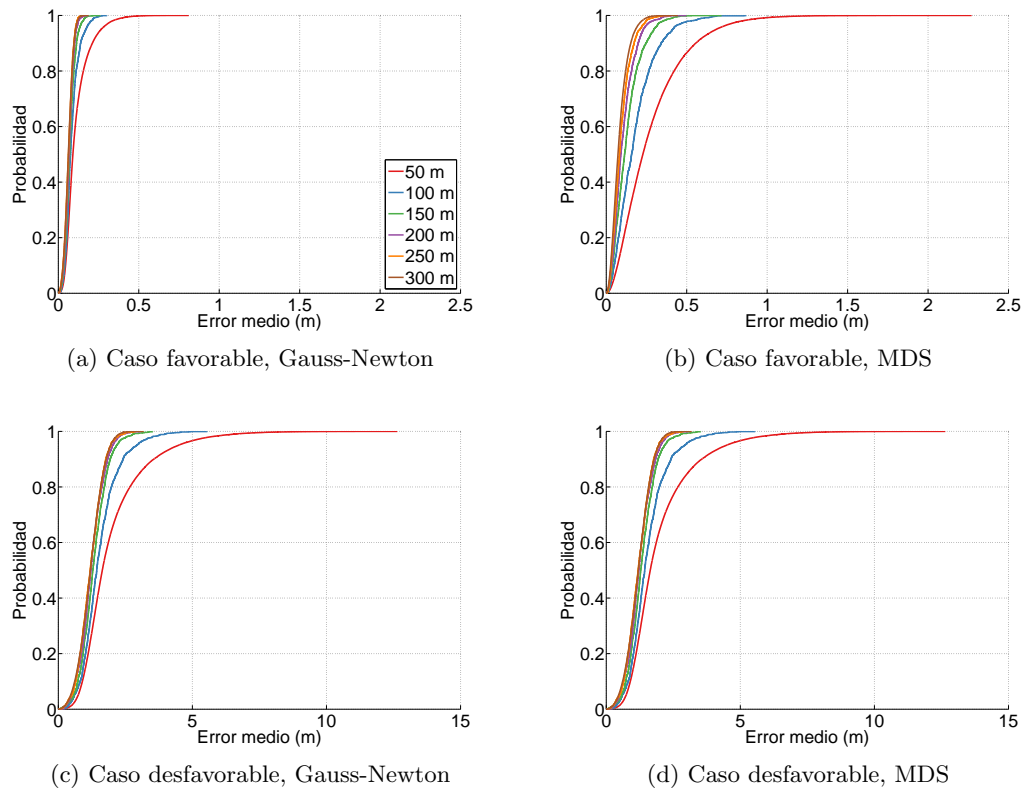


Figura 5.34: Variación del error medio con la distancia para los algoritmos de Gauss-Newton y MDS, considerando cinco nodos superficiales

La figura 5.35 recoge los resultados obtenidos, donde se muestra el caso con  $\sigma_{GPS} = 0$  m (a),  $\sigma_{GPS} = 0.3$  m (b) y  $\sigma_{GPS} = 3$  m (c). Hay que resaltar que se han utilizado diferentes escalas en el eje X en las gráficas de cada figura para mejorar la visibilidad de los resultados, debido a que los rangos de error son muy diferentes entre sí. Considerando una separación de 50 m y  $\sigma_{GPS} = 0.3$  m, la mejor estimación se obtiene con el algoritmo Levenberg-Marquardt, con un error medio de 2.4 m, mientras que la peor estimación se obtiene con Cayley-Menger y trilateración esférica, con un error medio de 3.8 m. Estos valores suponen un aumento de 1.7 m para Levenberg-Marquardt y de 3.1 m para Cayley-Menger y trilateración esférica, respecto a la situación en la que  $\sigma_{GPS} = 0$  m. Al aumentar el error del GPS ( $\sigma_{GPS} = 3$  m), los errores medios aumentan considerablemente en todos los algoritmos. El que mejor resultados obtiene sigue siendo Levenberg-Marquardt con un error medio de 21.4 m, mientras que el peor resultado se obtiene nuevamente con Cayley-Menger y trilateración esférica, con un error medio de 37 m.

De manera similar a los casos estudiados en las secciones anteriores, aumentar la distancia entre nodos y el número de estos reduce el error medio del sistema. Considerando una distancia de 300 m y tres nodos superficiales, así como  $\sigma_{GPS} = 0.3$  m, Gauss-Newton obtiene la mejor estimación con un error medio de 71 cm, mientras que en el resto de algoritmos este error está en torno a un metro. Al aumentar el error del GPS ( $\sigma_{GPS} = 3$  m)

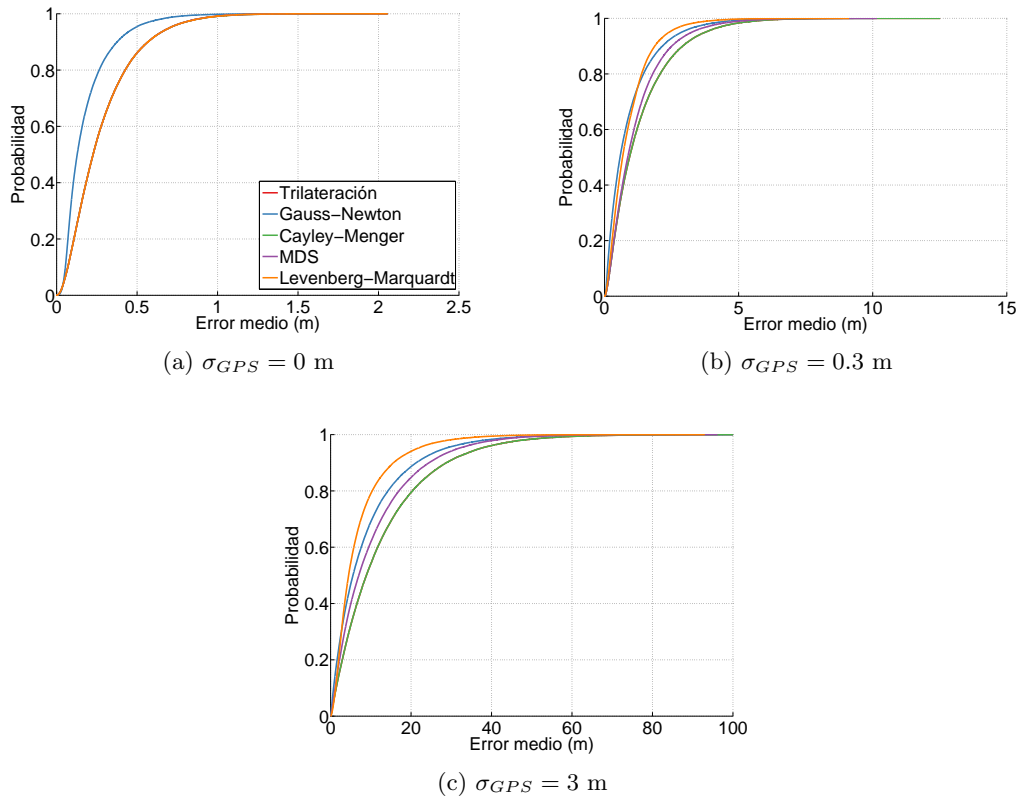


Figura 5.35: CDF de la variación del error medio debido al GPS, considerando tres nodos superficiales separados 50 m

el error medio proporcionado por Gauss-Newton aumenta a su vez hasta los 7 m, mientras que la peor estimación se obtiene con Cayley-Menger y trilateración esférica, con un error medio de 9.6 m.

La peor situación en la que puede funcionar el sistema es un error elevado ocasionado por una mala estimación del GPS, así como una mala estimación de las distancias obtenida por las señales acústicas. Esta situación se representa en la figura 5.36, donde se ha considerado que  $\sigma_{GPS} = 3$  m, y que  $\mu_{acu} = 1$  m y  $\sigma_{acu} = 0.50$  m, donde hay tres nodos superficiales separados una distancia de (a) 50 m, y (b) 300 m. En este caso se obtiene un error de 22.9 m en el caso (a) y de 7.2 m en el caso (b), ambos con Levenberg-Marquardt, que es el que presenta mejores resultados. Estos errores son ligeramente superiores a los obtenidos para una estimación acústica favorable, tal y como se reflejó en la figura 5.35, aunque están en el mismo orden de magnitud. Esto demuestra que el efecto del GPS predomina sobre la incorrecta estimación de distancia mediante las señales acústicas.

Estos resultados muestran la gran influencia de una mala estimación de la posición obtenida por el GPS en los nodos superficiales, con errores medios que pueden llegar a los 20 o 30 m para los peores casos. Estos errores pueden minimizarse utilizando más nodos superficiales y aumentando la separación entre ellos, mejorando así la configuración geométrica del sistema y aumentando la información presente en los algoritmos de

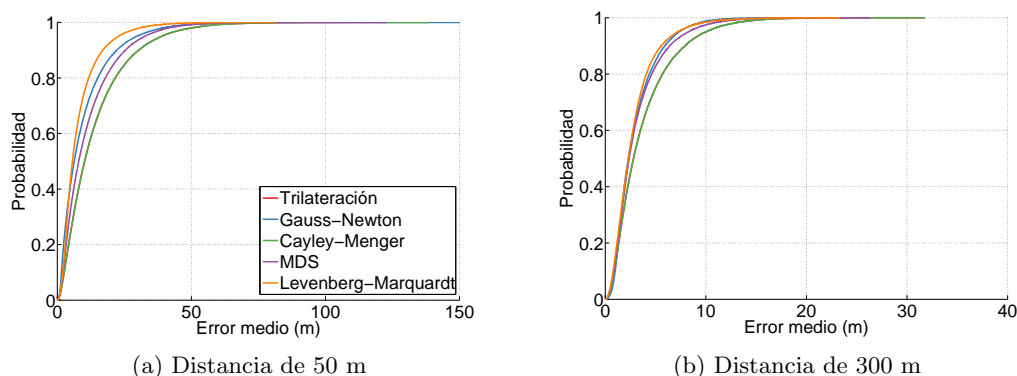


Figura 5.36: Variación del error medio debido al GPS, usando tres nodos superficiales y una medida acústica desfavorable

posicionamiento.

Hay que destacar también que el efecto del GPS se hace notar especialmente en los algoritmos de Cayley-Menger, Gauss-Newton y trilateración esférica, en los que uno de los datos de entrada es la posición de los nodos superficiales. El algoritmo MDS sólo considera las distancias relativas entre los distintos nodos, y aunque esta distancia sí está afectada por este error, éste se ve minimizado por el propio proceso que sigue el algoritmo al calcular la posición, tratando este error de la misma manera que si fuera un error en la estimación acústica entre los nodos superficiales y el nodo sumergido. En este caso, el uso del algoritmo de Levenberg-Marquardt sí que introduce además una mejora significativa de los resultados proporcionados por el MDS, reduciendo de manera notable el error medio, tal y como se puede observar en las figuras 5.35 y 5.36.

## 5.5. Conclusiones

Este capítulo recoge los datos más significativos obtenidos en esta tesis. Por un lado se han presentado los resultados que permiten validar el modelo de propagación acústica subacuática, y por otro, los resultados obtenidos para el sistema de posicionamiento propuesto basado en GPS y señales acústicas codificadas. A continuación se desarrollan los aspectos más relevantes en detalle:

- Se ha realizado una validación del modelo de propagación comparando sus resultados con el modelo BELLHOP, que presenta un uso extendido en este medio, así como con pruebas reales en entornos controlados y pruebas reales en entornos abiertos obtenidas de la literatura. En todos los casos el modelo muestra muy buen acuerdo especialmente en lo que respecta a la estimación del patrón de llegadas y los tiempos de vuelo de dichas llegadas. Los valores obtenidos para las pérdidas de transmisión presentan diferencias con los resultados reales, tal y como cabría esperar, puesto que es un parámetro más difícil de modelar por su gran dependencia con el entorno. Por lo tanto,

estas diferencias se pueden achacar a la propia incertidumbre asociada las ecuaciones utilizadas en el modelo para describir estas pérdidas, así como a la imposibilidad de tener perfectamente caracterizado todo el entorno real.

- Basándose en el conocimiento previo del grupo, se han seleccionado dos esquemas de codificación (CSS y secuencias Kasami), y se ha realizado una comparativa de su funcionamiento en entornos subacuáticos. Los resultados obtenidos han mostrado el mejor comportamiento de las secuencias Kasami frente al efecto cerca-lejos especialmente, obteniendo menos datos espurios en la estimación de distancias, siendo por tanto más robustos que los CSS.
- Se ha estudiado la influencia del multicamino, viento, ruido blanco Gaussiano y atenuación en la estimación de distancias a través de la emisión, recepción, correlación y detección de picos mediante secuencias Kasami. La influencia de estos efectos ha sido cuantificada para tres canales diferentes que representan tres entornos tipo afectados de distinta manera por estos parámetros. En este estudio se ha identificado al multicamino como el efecto que más error introduce en la medida acústica, siendo su efecto más importante en entornos de aguas poco profundas. Cuando el multicamino no es importante, los errores en la estimación de distancias son muy bajos, del orden de centímetros.
- Se ha realizado un estudio sobre la influencia de la configuración geométrica del sistema de posicionamiento, errores en el sensor de presión, errores en el GPS y en la estimación de distancias mediante las señales codificadas en el error en la posición estimada por el sistema para los distintos algoritmos de posicionamiento estudiados. En este estudio se ha mostrado que el efecto que introduce más error en el sistema es una mala estimación de la posición de un nodo superficial ocasionada por el error en el GPS. También se ha comprobado que aumentar el número de nodos superficiales y la distancia entre ellos (hasta cierto punto) mejora el comportamiento del sistema, debido a una mejor distribución geométrica y al aumento de información presente en el sistema. Todas estas conclusiones se han acompañado de una cuantificación de los errores medios obtenidos con los algoritmos de posicionamiento, mostrando que de manera general el algoritmo de Gauss-Newton presenta los mejores resultados para la mayoría de situaciones, mejorando sus prestaciones al aumentar el número de nodos superficiales, al igual que Cayley-Menger y el algoritmo de trilateración esférica. Así mismo, se ha probado que los algoritmos de MDS y Levenberg-Marquardt son más resistentes al error introducido por el GPS, aunque cuando el número de nodos superficiales aumenta, sus resultados son comparables a los obtenidos por Gauss-Newton. Adicionalmente, el error introducido por la incertidumbre del sensor de presión en las magnitudes típicas de estos sensores y para los entornos considerados no incrementa el error medio en la posición de manera significativa.
- Los errores obtenidos por los distintos algoritmos muestran que el sistema propuesto

---

es muy competitivo con los ya existentes en la literatura y en el mercado, obteniendo errores de centímetros o de pocos metros en los peores casos, para un número razonable de nodos superficiales y aprovechando una correcta distribución de ellos en el entorno.



## Capítulo 6

# Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se recogen las conclusiones más relevantes extraídas del trabajo realizado en esta tesis, indicándose también las futuras líneas de investigación relacionadas con la temática estudiada. Adicionalmente, se incluyen las publicaciones derivadas de este trabajo relacionándolas con los distintos aspectos abordados.

### 6.1. Conclusiones

En esta tesis se ha abordado el estudio de la propagación acústica en entornos subacuáticos y el funcionamiento de un sistema de posicionamiento para dichos entornos basado en la emisión de señales acústicas codificadas. En este sentido, las contribuciones más relevantes realizadas en este trabajo son las que se detallan a continuación:

#### 6.1.1. Desarrollo de un modelo de propagación acústica subacuática

Se ha desarrollado un modelo de propagación acústica para entornos subacuáticos basado en el estudio realizado sobre la fenomenología presente en el canal, identificando los principales efectos que influyen en la propagación de ondas acústicas en estos entornos.

El modelo está basado en la teoría de trazado de rayos y considera los principales efectos de propagación, que son: divergencia geométrica, absorción, pérdidas de energía por rebotes en la superficie del mar y el fondo, y reconstrucción del patrón de multicamino presente en recepción. Adicionalmente y a diferencia de la mayoría de modelos existentes, incluye el efecto dinámico provocado por la superficie del mar, que provoca un ensanchamiento Doppler y desvanecimiento en la señal reflejada en esta superficie, afectando por tanto a la interferencia total en la señal recibida.

El modelo considera un perfil de velocidad del sonido, por lo que tiene en cuenta la curvatura de los rayos debido a la variación de la velocidad del sonido con la profundidad.

De esta manera se puede emplear tanto en entornos de aguas poco profundas, donde la velocidad del sonido es constante, como en entornos de aguas profundas, donde la variación de la velocidad del sonido puede ser importante.

Debido a las ecuaciones consideradas para describir los distintos fenómenos físicos, el modelo tiene un amplio rango de validez, aumentando dicho rango respecto al de otros modelos disponibles en la literatura. El modelo se puede usar tanto en agua dulce como agua salada, y para frecuencias de señal acústica entre 200 Hz y 1 MHz. Adicionalmente, permite la inclusión de perfiles de batimetría, por lo que puede representar de una manera más fiel la propagación acústica en entornos cuya profundidad depende de la distancia.

Los resultados obtenidos con el modelo de propagación han sido validados a su vez mediante diferentes pruebas:

- Se han comparado los resultados del modelo con los proporcionados por uno de los modelos de trazado de rayos más conocidos y usados por la comunidad, como es BELLHOP [PB87]. Los resultados obtenidos muestran el buen comportamiento del modelo para distintos entornos considerados.
- Se han realizado pruebas reales en entornos controlados, donde a pesar de los efectos tridimensionales no considerados en el modelo, introducidos por las paredes laterales de estos entornos, los resultados en lo que respecta a tiempos de vuelo e identificación del patrón global de llegadas son positivos. El modelo es capaz de identificar además el instante de llegada de máxima energía, pudiendo ser ésta distinta a la primera llegada.
- Se ha realizado una última comparación con resultados obtenidos en un entorno de aguas poco profundas, extraídos de un artículo de Chitre [Chi07]. En esta comparativa se vuelve a obtener un buen funcionamiento del modelo en lo que respecta a la detección de las distintas llegadas.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo desarrollado representa con un buen grado de detalle las características principales de la propagación acústica en entornos subacuáticos diversos. Adicionalmente, su uso no está restringido al estudio realizado en esta tesis sobre sistemas de posicionamiento, sino que su versatilidad le permite ser utilizado en distintas aplicaciones, como sistemas sónar o de comunicaciones.

### 6.1.2. Estudio sobre la influencia del medio en señales codificadas

El uso de señales acústicas codificadas en estos entornos ha estado asociado a esquemas de codificación basados en códigos Barker o secuencias-m fundamentalmente, empleándolos en sistemas de comunicaciones. Su uso en sistemas de posicionamiento estaba por explorar en detalle, por lo que en esta tesis se han considerado dos esquemas de codificación diferentes, conjuntos de secuencias complementarias (CSS) y secuencias Kasami, para buscar la mejor



alternativa en entornos subacuáticos. El estudio de estos esquemas de codificación se ha abordado mediante el modelo de propagación desarrollado, en dos fases diferentes.

### **Comparativa entre CSS y Kasami**

Para la realización de este estudio se ha considerado un entorno tipo y un sistema que tenga en cuenta los principales efectos que pueden aparecer en un sistema de posicionamiento, que son: atenuación de la señal, ruido, efectos dinámicos introducidos por el viento y multicamino. La atenuación de la señal junto al multicamino provocarán a su vez dos fenómenos adicionales, como son ISI y MAI, donde este último además puede verse afectado por el efecto cerca-lejos.

El estudio desarrollado ha demostrado que los códigos Kasami son más tolerantes a estos efectos que los CSS, debido a que estos últimos presentan una mayor degradación de sus propiedades ideales al ser transmitidos al medio como macrosecuencias. Esto hace que los códigos CSS sean más sensibles fundamentalmente al efecto cerca-lejos, originando más datos espurios en la detección de las señales y, por tanto, generando más estimaciones erróneas que con los códigos Kasami.

### **Influencia del medio subacuático en la detección de códigos Kasami**

Una vez que se ha identificado a los códigos Kasami como aquellos que presentan las mejores propiedades, se ha realizado otro estudio con el modelo desarrollado para estudiar la influencia del medio en la detección de estos códigos, y el consiguiente error en la medida de distancias, obtenidas a partir de los tiempos de vuelo detectados mediante correlación. Este estudio aportará una información muy valiosa, puesto que la estimación de distancias obtenida mediante la detección de códigos Kasami es clave en el funcionamiento del sistema de posicionamiento propuesto.

En dicho estudio se ha abordado la influencia del ruido, multicamino, efectos dinámicos generados por el viento y atenuación de la señal en la estimación de tiempos de vuelo mediante la detección de códigos Kasami, tanto de forma cualitativa como cuantitativa. En la realización de este estudio se han considerado tres entornos diferentes, de manera que se pueda estudiar también la incertidumbre debida a la suposición de una velocidad de sonido constante en el cálculo de la distancia. Las conclusiones principales de este estudio son:

- El multicamino juega un papel principal en la estimación de los tiempos de vuelo. Entornos con mayor multicamino, como son los entornos de aguas poco profundas, presentan errores medios mayores y detecciones con mayor dispersión, mostrando más variabilidad en los resultados. Por el contrario, entornos con menor multicamino presentan detecciones más precisas y exactas.
- El viento se comporta principalmente como agente destructor de multicamino, debido

a que las señales reflejadas en la superficie pierden más energía cuando el viento es mayor.

- El ruido blanco Gaussiano no presenta una influencia determinante en los valores considerados (-12 a 12 dB). Su efecto únicamente es apreciable cuando se combina con un valor bajo de viento, siendo esta situación la que presenta los mayores errores en la detección.
- La atenuación de la señal debida a la distancia entre nodos tampoco presenta una influencia determinante para los valores considerados de distancia máxima entre nodos y frecuencia de señal acústica.
- La incertidumbre en la velocidad del sonido no es relevante a las distancias consideradas, ya que los errores obtenidos son del orden de centímetros. No obstante, será un efecto a tener en cuenta si las distancias entre emisor y receptor superan el kilómetro.

A la vista de estos resultados, se puede determinar que los códigos Kasami presentan las propiedades deseadas para el sistema de posicionamiento propuesto en cuanto a tolerancia al ruido blanco Gaussiano, efecto cerca-lejos, ISI y MAI. La detección de los tiempos de vuelo obtenidos a partir de la detección de señales codificadas con códigos Kasami presenta errores bajos, generalmente del orden de centímetros, salvo excepciones puntuales en entornos de aguas poco profundas. Este estudio de los errores obtenidos ha resultado de gran importancia para el sistema de posicionamiento propuesto, tal y como se mostrará a continuación.

### **6.1.3. Propuesta de sistema de posicionamiento basado en señales acústicas codificadas y GPS, y estudio de su funcionamiento**

Se ha presentado en esta tesis un sistema de posicionamiento que consta de una serie de nodos superficiales (boyas o barcos) equipados con GPS, empleados para detectar la posición de un nodo sumergido mediante la emisión, recepción y detección de señales acústicas codificadas, sin ningún tipo de procesamiento adicional.

El estudio del funcionamiento de este sistema se ha abordado con el modelo de propagación desarrollado, considerando los errores en la estimación de distancias obtenidos en la detección de códigos Kasami, así como los errores en la posición proporcionada por el GPS, la influencia de la distancia entre los distintos nodos superficiales o la influencia del número de estos en la posición obtenida por distintos algoritmos de posicionamiento, tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Los resultados más relevantes que se han obtenido de este estudio son los siguientes:

- Los errores obtenidos en la posición del nodo sumergido mejoran al separar los nodos superficiales, debido a una mejor distribución geométrica de los distintos nodos del

sistema. Esta mejora no es indefinida, sino que viene dada por las configuración geométrica resultante en cada momento.

- La incertidumbre obtenida por la estimación errónea de la posición en uno nodo superficial es una de las mayores fuentes de error en la posición final obtenida por los algoritmos de posicionamiento. Esto sugiere el uso de tecnologías como el GPS diferencial o sistemas que permitan acotar dicho error.
- El resultado proporcionado por los distintos algoritmos de posicionamiento estudiados es muy similar para la mayoría de casos. No obstante, se ha observado que al aumentar el número de nodos superficiales los algoritmos de Gauss-Newton, Cayley-Menger y trilateración esférica mejoran sus resultados en mayor medida que los algoritmos MDS y Levenberg-Marquardt, lo que sugiere que estos algoritmos son los más indicados para un sistema genérico, especialmente si el número de nodos superficiales es mayor al mínimo requerido.

Frente a otros sistemas estudiados, éste tiene la ventaja de ser fácilmente desplegable en el medio, no necesitando además de ninguna fase de calibración gracias al uso de la tecnología GPS. Adicionalmente, su área de cobertura es variable, adaptándose a las necesidades particulares de la aplicación, no necesitando que el sistema tenga que seguir al nodo sumergido. El uso de técnicas CDMA permite obtener una mayor inmunidad al ruido, tal y como han mostrado los resultados obtenidos, así como una detección más exacta de los tiempos de vuelo, además de permitir la inclusión de más nodos sumergidos en el sistema de una manera sencilla.

Los errores obtenidos por el sistema propuesto demuestran que es un sistema versátil y competitivo con los sistemas que se encuentran en la literatura, obteniendo errores del orden del centímetro en las mejores estimaciones, o de metros o algunas decenas de metros en las peores. Estas peores estimaciones se pueden resolver acotando el error del GPS, aunque hay que resaltar que aun en este caso, los errores siguen estando en el mismo margen que la amplia mayoría de sistemas existentes.

El sistema puede ampliar su versatilidad sin un aumento importante de su complejidad, permitiendo el posicionamiento de varios nodos en el entorno, tanto de forma directa como mediante un posicionamiento colaborativo. Con la inclusión de un protocolo de comunicaciones en todos los nodos, el sistema propuesto puede convertirse también en un sistema de posicionamiento relativo, donde se podría prescindir del GPS, o al menos, se podrían acotar los errores cometidos por éste.

## 6.2. Trabajo futuro

En esta tesis se ha presentado un nuevo modelo de propagación acústica para entornos subacuáticos, así como un sistema de posicionamiento basado en señales acústicas

codificadas y GPS. Los resultados obtenidos en ambos campos son prometedores, mostrando la versatilidad tanto del modelo como del sistema propuesto. No obstante, queda mucho trabajo por hacer en estos campos. Más concretamente, algunas de las tareas más inmediatas a desarrollar son:

- *Mejora del modelo de propagación propuesto.*

El modelo ha sido validado en entornos reales complejos, así como en entornos reales abiertos y mediante comparativas con otro modelo de propagación. No obstante, existe margen para mejorar el modelo incorporando efectos adicionales, como por ejemplo un perfil de velocidad del sonido dependiente de la distancia, un modelo de ruido más complejo que el ruido blanco Gaussiano considerado actualmente, o la inclusión de turbulencias o efectos ocasionados por burbujas. La inclusión de estos efectos permitirá estudiar su influencia en sistemas diversos.

- *Estudio del desempeño del sistema de posicionamiento en la localización de varios nodos sumergidos.*

En este trabajo se ha recogido el estudio del sistema de posicionamiento en lo que respecta a la localización de un nodo sumergido. La ampliación a diversos nodos sumergidos es el siguiente paso lógico en el sistema, siendo algo que la codificación empleada permitiría siempre y cuando se escoja una familia de códigos ortogonales adecuada.

- *Incrementar la funcionalidad del sistema propuesto.*

El sistema de posicionamiento obtiene la posición del nodo sumergido en el nodo maestro, que generalmente será el barco donde se encuentra todo el equipo y tripulación. Modificando el proceso de medida, se pueden incluir algunas mejoras en el sistema de posicionamiento, de manera que el nodo sumergido también pueda conocer su posición. Adicionalmente, si existen diversos nodos sumergidos y estos pueden conocer su posición, se puede implementar también un modo cooperativo de localización, en el caso en que las señales emitidas por los nodos superficiales no lleguen correctamente a ciertos nodos sumergidos.

- *Protocolo de comunicaciones acústico.*

En este trabajo se ha asumido que existe un sistema de comunicaciones acústico para que el nodo sumergido le pueda comunicar su profundidad al nodo maestro. El desarrollo de este protocolo de comunicaciones se escapa de los objetivos de esta tesis, pero es uno de los trabajos más inmediatos para abordar en el futuro. Adicionalmente, extender este protocolo de comunicaciones al resto de nodos permitiría que el sistema funcionase como un sistema de posicionamiento relativo.

- *Realización de pruebas experimentales.*

El estudio sobre el desempeño del sistema de posicionamiento propuesto se ha realizado mediante análisis estadísticos realizados con el modelo de propagación desarrollado.

No obstante, se tiene programado realizar un prototipo que permita estudiar y validar el sistema propuesto con pruebas reales. En lo que respecta al modelo de propagación, se realizarán pruebas que permitan validar los resultados del modelo cuando hay viento presente.

### 6.3. Publicaciones derivadas de la tesis

Las distintas fases del trabajo realizado en esta tesis se han recogido en distintas publicaciones en revistas y congresos del sector, que se detallan a continuación.

#### Publicaciones en revistas internacionales

- [AJA+2011c] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani y C. Diego. Modeling the Behavior of an Underwater Acoustic Relative Positioning System Based on Complementary Set of Sequences. *Sensors* 11, pp. 11188-11205, 2011.

Las principales aportaciones realizadas en este trabajo son un sistema de posicionamiento relativo para boyas en la superficie del mar que emplea señales codificadas con CSS (sección 4.2.1) y el algoritmo de posicionamiento MDS (sección 4.4.4), estudiado mediante el modelo de propagación descrito en el capítulo 3, aunque sin incluir todavía los perfiles de batimetría. Se presentó además un estudio del efecto del canal sobre los códigos CSS y se mostró una aplicación de seguimiento de las boyas mediante el sistema de posicionamiento.

- [AJA+2014] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani, D. de Diego, N. Cruz y H. Campos. Accurate Detection of Spread-Spectrum Modulated Signals in Reverberant Underwater Environments. *Applied Acoustics*, enviado y en proceso de revisión, 2014.

La principal aportación de este trabajo es la presentación del modelo de propagación completo, tal y como se ha descrito en el capítulo 3, incluyendo además los resultados de validación para entornos reales controlados mostrados en la sección 5.1.2.

#### Publicaciones en congresos internacionales

- [AAU+2010] J. Aparicio, F.J. Álvarez, J. Ureña, A. Jiménez, C. Diego y E. García. Swell Effect in Shallow Underwater Acoustic Communications. En *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2010)*, Bilbao (España), 4 páginas, septiembre 2010

En este trabajo se presentó una primera versión del modelo de propagación válido para entornos de aguas poco profundas, donde se estudiaba la influencia del oleaje generado por el viento descrito en la sección 3.3 en el multicamino presente en una señal transmitida en este entorno.

- [AAJ+2011] J. Aparicio, F.J. Álvarez, A. Jiménez, C. De Marziani, J. Ureña y C. Diego. Underwater Channel Modeling for a Relative Positioning System. En *Proceedings of the OCEANS 2011 Conference*, Santander (España), 7 páginas, junio 2011.

En este trabajo se presentó una versión más actualizada del modelo que ya incluía el perfil de velocidad del sonido y por tanto se podía aplicar a entornos de aguas profundas. Además, se mostraba la validación del modelo mediante la comparación con pruebas reales obtenidas en la literatura (véase sección 5.1.3), y se aplicaba el modelo al estudio de un sistema de posicionamiento relativo que operaba en la superficie del mar que se empleaba para medir corrientes superficiales.

- [AJA+2011b] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, C. De Marziani, J. Ureña y C. Diego. Underwater Acoustic Relative Positioning System Based on Complementary Set of Sequences. En *Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2011)*, Guimarães (Portugal), 4 páginas, septiembre 2011.

En este trabajo se presentó un sistema de posicionamiento relativo que operaba en la superficie del mar mediante la emisión y recepción de señales acústicas codificadas con CSS, y se realizaba un estudio de la influencia de distintos parámetros del entorno en el error obtenido por el algoritmo de posicionamiento MDS.

- [AJA+2012] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani y C. Diego. Comparative Analysis of an Underwater Acoustic Relative Positioning System using Coded Signals. En *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA 2012)*, Edimburgo (Reino Unido), pp. 502-509, julio 2012.

En este trabajo se presentó una comparativa del desempeño de los códigos CSS y Kasami bajo distintas condiciones de viento y ruido del canal subacuático. Este estudio se realizó con el modelo de propagación desarrollado, obteniendo el error en la posición en un sistema de posicionamiento relativo utilizando ambos esquemas de codificación (véase sección 5.2).

- [AJA+2013a] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani y C. Diego. Influence of Different Phenomena on the Errors in Distance Measurement Using Underwater Acoustics Coded Signals. En *Proceedings of the OCEANS 2013 Conference*, Bergen (Noruega), 8 páginas, junio 2013.

En este trabajo se presentó un estudio de la influencia de distintos canales subacuáticos y diversas condiciones medioambientales en la estimación de distancias entre dos nodos mediante códigos Kasami (véase sección 5.3).

#### **Publicaciones en revistas nacionales**

- [AGJ+2010a] J. Aparicio, E. García, A. Jiménez, F.J. Álvarez y J. Ureña. Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I). En *CONECTrónica*, número 137, pp. 40-43, mayo 2010.

En este trabajo se abordó una revisión histórica a la propagación de señales acústicas en entornos subacuáticos, y se presentaron los parámetros fundamentales que tienen lugar en estas propagaciones, descritos en la sección 3.

- [AGJ+2010b] J. Aparicio, E. García, A. Jiménez, F.J. Álvarez y J. Ureña. Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (II). En *CONECTrónica*, número 139, pp. 40-41, julio-agosto 2010.

En este trabajo se detallaron los canales especiales de propagación que tienen lugar debido a la forma del perfil de velocidad del sonido, descritos en la sección 3.1.1.

- [AGJ+2010c] J. Aparicio, E. García, A. Jiménez, F.J. Álvarez y J. Ureña. Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (y III). En *CONECTrónica*, número 140, pp. 39-43, septiembre 2010.

En este trabajo se habló de diversos mecanismos adicionales que tienen lugar en la propagación de señales acústicas en entornos subacuáticos, recogidos en el apéndice A.

#### **Publicaciones en congresos nacionales**

- [AUJ+2010] J. Aparicio, J. Ureña, A. Jiménez, F.J. Álvarez, R. Sanz y E. García. Sistema de Medida para las Características de un Canal en Comunicaciones Acústicas Subacuáticas. En *Actas del XVII Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI 2010)*, pp. 482-487, Bilbao (España), julio 2010.

En este trabajo se presentó una aplicación del modelo de propagación para estudiar un sistema de comunicaciones en entornos subacuáticos, estudiando un sistema de medida para obtener la respuesta del canal.

- [AAJ+2010] J. Aparicio, F.J. Álvarez, A. Jiménez, R. Sanz, E. García y C. Diego. Simulador de un Canal Acústico Dinámico Subacuático. En *Publicación Oficial del Congreso: 41º Congreso Nacional de Acústica - TecniAcústica*, 8 páginas, octubre 2010.

En este trabajo se presentó un estudio realizado con el modelo de propagación en entornos de aguas poco profundas mostrando la influencia del viento en el multicamino

total presente en recepción.

- [AJA+2011a] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, C. De Marziani, R. Sanz, y C. Diego. Modelado de canal subacuático dinámico para un sistema de posicionamiento relativo ultrasónico. En *Actas del XVIII Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación* (SAAEI 2011), pp. 879-884, Badajoz (España), julio 2011.

En este trabajo se mostró un estudio de un sistema de posicionamiento relativo funcionando en la superficie del mar. Este sistema empleaba códigos CSS y el algoritmo MDS para obtener la posición de todos los nodos del sistema. Se estudió el efecto del viento y el ruido en el error cometido en la estimación de la posición.

- [AJA+2013b] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, D. Ruiz y J. Ureña. Modelo de propagación acústica subacuática para el estudio de sistemas de comunicaciones o de localización. En *Actas: Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad* (DESEi+D 2013), pp. 175-182, Madrid (España), noviembre 2013.

En este trabajo se presentó el modelo de propagación completo, así como su aplicación para sistemas de comunicaciones y de localización. Como ejemplo, se presentó un sistema de posicionamiento con nodos superficiales equipados con GPS y transductores acústicos muy similar al descrito en la sección 4.1, y se estudió el posicionamiento de un robot sumergido que seguía una determinada trayectoria mediante el algoritmo de Cayley-Menger, presentado en la sección 4.4.3.



## Apéndice A

# Otros efectos en la propagación acústica subacuática

En el capítulo 3 se ha hablado de los fenómenos que se ha considerado tienen un papel fundamental en la propagación acústica, y que han sido incluidos en el modelo de propagación desarrollado. No obstante, existen otros efectos, tanto en el medio como asociados a la técnica de trazado de rayos, que afectan a la propagación acústica.

A continuación se revisarán brevemente estos fenómenos adicionales, aunque ninguno de ellos ha sido incluido en la versión actual del modelo al ser fenómenos de gran variabilidad, o que tienen lugar bajo unas condiciones muy particulares, por lo que se podrían considerar fenómenos de segundo orden. De la misma manera, no es común su aparición en ninguno de los modelos de propagación citados en el capítulo 2.

### A.1. Reverberación

La reverberación es la suma de toda la energía acústica dispersada por el medio en los distintos procesos de *scattering*. Estos procesos engloban la dispersión generada por la superficie del mar y el fondo en el rebote de la señal acústica, así como la provocada por las propias inhomogeneidades del medio, ya sean partículas en suspensión o la fauna marina. Esta última provoca por ejemplo unos niveles de reverberación muy particulares en una capa denominada capa de dispersión profunda (*deep scattering layer*), cuya profundidad varía a lo largo del día y de la ubicación geográfica, oscilando entre los 180 y 900 m durante el día, y subiendo a profundidades menores durante la noche [Uri83].

El efecto global de la reverberación es el de un ruido oscilante y de larga duración que sucede a la emisión acústica, y se ha estudiado principalmente para su aplicación en el sónar. En estos sistemas el receptor se encuentra generalmente en el mismo punto que el emisor, y recibe señal casi inmediatamente después de la emisión de un ping acústico debido

a la reverberación procedente de las fuentes ya descritas. Esta señal llega antes de aquella procedente del objetivo a detectar.

Una parte importante del nivel de reverberación procede de las inhomogeneidades presentes en la masa de agua, y se conoce como reverberación de volumen (*volume reverberation*). Este nivel se puede calcular considerando una señal de intensidad constante durante un tiempo finito  $\tau$ , como A.1 [Uri83]

$$RL_v = SL - 40 \log r + S_v + 10 \log \frac{c\tau}{2} \Omega r^2 \quad (\text{A.1})$$

donde  $SL$  es el nivel de fuente,  $r$  la distancia recorrida,  $c$  es la velocidad del sonido,  $\tau$  la duración del pulso emitido,  $\Omega$  el ángulo sólido del haz emitido y  $S_v$  la intensidad de *scattering* volumétrica, definida como  $S_v = 10 \log(I_{scat}/I_{inc})$ , siendo  $I_{scat}$  la intensidad acústica de la señal dispersada en un volumen de  $1 \text{ m}^3$  a una distancia de  $1 \text{ m}$  de este volumen en el sentido de vuelta al emisor, e  $I_{inc}$  la intensidad acústica de la onda plana incidente en dicho volumen.

Parte de estas inhomogeneidades se distribuyen en una superficie plana, en lugar de en un volumen, como ocurre en la masa de agua. A esta reverberación se la conoce como reverberación de superficie (*surface reverberation*), y se calcula de manera análoga a (A.1),

$$RL_s = SL - 40 \log r + S_s + 10 \log \frac{c\tau}{2} \Lambda r^2 \quad (\text{A.2})$$

donde ahora  $\Lambda$  es el ángulo del haz.

Tal y como se avanzó en la sección 3.2.3, la superficie del mar provoca una dispersión de la energía incidente en ella en todas las direcciones, originando así un proceso de reverberación. Esta reverberación parece depender del ángulo de incidencia, la frecuencia de la señal incidente y la rugosidad de la superficie, que depende a su vez de la velocidad del viento. Existen varios estudios al respecto que buscan una relación entre la intensidad de *scattering* de la superficie con todas o algunas de estas variables. Entre estos estudios se pueden citar el de Chapman y Harris, Marsh, Chapman y Scott, Schulkin y Shaffer y Bachmann [Uri83]. No todas las expresiones obtenidas en estos estudios muestran la misma dependencia en relación al ángulo de incidencia, viento y frecuencia, o se pueden emplear en el mismo rango de valores.

Una de las expresiones más completas es la de Chapman y Harris (A.3), que incluye una dependencia con las tres variables, y donde la diferencia media obtenida entre la intensidad de *scattering* de la superficie del mar,  $S_{sur}$ , y los resultados reales era de aproximadamente 2 dB.

$$S_{sur} = 3.3\beta \log \frac{\theta_s}{30} - 42.4 \log \beta + 2.6 \quad (\text{A.3})$$

En la ecuación (A.3)  $\theta_s$  es el ángulo de incidencia rasante medido en grados, y  $\beta = 158(v_w f^{1/3})^{-0.58}$ , siendo  $v_w$  la velocidad del viento en nudos, y  $f$  la frecuencia en Hz. Si además la superficie del mar está cubierta de una capa de hielo, la reverberación será aun mayor.

De manera análoga, el fondo del mar también provoca el *scattering* de la señal en la reflexión, originando otro proceso de reverberación, introducido en la sección 3.2.3. Esta reverberación se debe a la rugosidad del fondo y a las partículas que forman los sedimentos que se encuentran depositados en él, y se caracteriza experimentalmente de forma análoga a la producida por la superficie del mar, midiendo la intensidad acústica de la señal dispersada tras la reflexión. Diversas medidas realizadas durante la década de los 60 mostraron una dependencia de la intensidad de *scattering* en el fondo respecto al ángulo de incidencia rasante y a la composición del fondo. También existe cierta dependencia con la frecuencia, que dependerá de cómo de rugoso sea el fondo en relación con la frecuencia de la señal incidente [Uri83].

## A.2. Burbujas

Las burbujas presentes en el agua afectan de diversa manera a la propagación acústica. Estas burbujas pueden provenir de varias fuentes como son el oleaje, el paso de barcos o la fauna marina, y provocan una variación de la velocidad del sonido, así como un proceso de reverberación al convertirse en centros dispersores de energía, siendo además una fuente de ruido, tal y como ya se detalló en la sección 3.4.

El proceso de interacción de las burbujas y la onda acústica depende del tamaño de las primeras y la frecuencia de la segunda, existiendo una frecuencia de resonancia para la cual la transferencia de energía de la onda a las burbujas es máxima. Esta frecuencia de resonancia se calcula según (A.4) [Com49]

$$f_r = \frac{326}{a} \sqrt{1 + 0.03z_b} \quad (\text{A.4})$$

donde  $a$  es el radio de las burbujas en centímetros, y  $z_b$  la profundidad a la que se encuentran, en pies. Para una determinada frecuencia, el tamaño de resonancia de las burbujas se puede obtener despejando  $a$  de esta ecuación.

En lo que respecta a la velocidad del sonido se distinguen dos casos. Para frecuencias bajas, el tamaño de resonancia de las burbujas aumenta. Si las burbujas presentes en el medio son menores que este tamaño de resonancia, la velocidad del sonido en esta región consistente en agua y burbujas de aire viene dada por [Uri83]

$$c_{bur} = c \left( \frac{1}{1 + 2.5 \cdot 10^4 \beta_{air}} \right)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

siendo  $c$  la velocidad del sonido en el agua libre de burbujas, y  $\beta_{air}$  la fracción de aire presente en la región. La influencia de las burbujas es crucial en la velocidad del sonido en este caso, puesto que una fracción de aire de un 0.01 % ( $\beta_{air} = 0.0001$ ) provoca una disminución de un 53 % en el valor de la velocidad del sonido. Para una frecuencia de 20 kHz y una profundidad de 1 m, el tamaño de resonancia es de 1.64 cm.

La figura A.1 muestra la variación de la velocidad del sonido para un entorno donde la profundidad es de 10 m, empleando la ecuación (A.5). Se ha considerado que cerca de la superficie del mar existe una región con burbujas de aire de un tamaño menor al de resonancia, con una concentración para el primer metro de profundidad de 0.001 %, y para el segundo metro, de 0.00001 %. Se puede apreciar una drástica reducción de la velocidad del sonido en el primer metro de profundidad, disminuyendo su valor hasta los 1350 m·s<sup>-1</sup>.

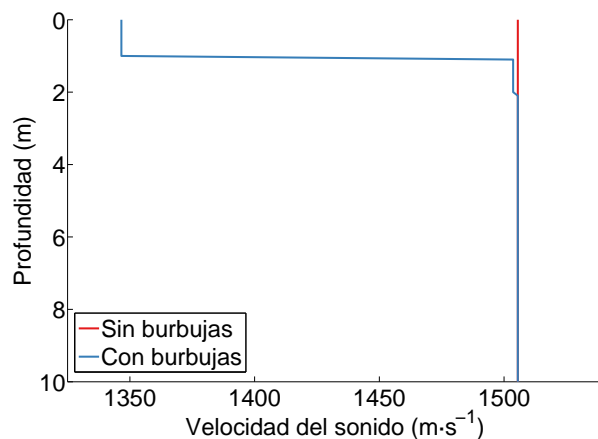


Figura A.1: Efecto de las burbujas en la velocidad del sonido

Para frecuencias elevadas, el tamaño de resonancia de las burbujas es muy pequeño. Si las burbujas presentes en el medio son mayores que este tamaño de resonancia, la velocidad del sonido en esta región viene dada por [MR63]

$$c_{bur}^{-2} = c^{-2} + \frac{4\pi n_{bur} g(a)}{\omega^2} \quad (\text{A.6})$$

donde  $n_{bur}$  es el número de burbujas en una unidad de volumen,  $\omega = 2\pi f$ , siendo  $f$  la frecuencia, y  $g(a)$  es una función que depende del radio de las burbujas, la frecuencia de la señal y la frecuencia de resonancia [MR63].

Las burbujas contribuyen además a la atenuación de la onda acústica, provocando el *scattering* de la señal. Este efecto depende de la sección transversal de absorción y la sección transversal de *scattering*, que se engloban en un término conocido como sección transversal de extinción (*extinction cross section*) [Com49], que viene dado por

$$\sigma_e = \frac{1}{k_r a} \frac{4\pi a^2 \delta}{(f_r^2/f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (\text{A.7})$$

donde  $k_r a = 2\pi f_r a/c$ , siendo  $f_r$  la frecuencia de resonancia de la burbuja de radio  $a$ ,  $f$  la frecuencia de la señal y  $\delta = (f_2 - f_1)/f_r$ , donde  $f_2$  y  $f_1$  son las frecuencias por encima y por debajo de la de resonancia en las cuales el cuadrado de la amplitud de las oscilaciones vale la mitad que para el valor de resonancia.

Considerando esta sección transversal de extinción, el coeficiente de atenuación en esta región viene dado por (A.8) [Com49], y la intensidad de *scattering* por unidad de volumen,

por (A.9) [Uri83], teniendo en cuenta que  $n_{bur}$  es el número de burbujas por  $m^{-3}$  y que en la ecuación (A.8) el radio  $a$  se expresa en yardas.

$$\alpha = 4.34n_{bur}\sigma_e \tag{A.8}$$

$$S_v = 10 \log \frac{n_{bur}a^2}{(f_r^2/f^2 - 1)^2 + \delta^2} \tag{A.9}$$

Si el tamaño de las burbujas no es el mismo, el estudio se complica. En este caso, la sección transversal debe ser calculada como una integral sobre todo el rango de radios de las burbujas. Actualmente existen otros estudios más complejos que recogen la interacción de nubes de burbujas con la señal acústica, donde tienen lugar múltiples procesos de *scattering* [WLB07].

El efecto de las burbujas es especialmente notable cerca de la superficie, pero se reduce de manera considerable sumergiendo los hidrófonos varios metros de profundidad [Hal89]. Adicionalmente, estudios recientes muestran que el efecto de la atenuación provocado por las burbujas es especialmente notable para velocidades del viento en superficie superiores a los  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , que es cuando las olas comienzan a introducir una densidad de burbujas en el agua apreciable. Estas pérdidas por tanto son prácticamente despreciables para velocidades menores [Pre06].

### A.3. Ondas internas

Las ondas internas (del inglés *internal waves*) son oscilaciones de las masas de agua que tienen lugar en el interior del propio fluido, a diferencia de las ondas generadas por el viento, que ocurren en la superficie del mar. Estas oscilaciones se deben a cambios en la densidad del agua producidas por fluctuaciones, fundamentalmente de la temperatura, y afectan por tanto a la propagación acústica al provocar variaciones en el perfil de velocidad del sonido. El resultado a una determinada profundidad es la variación de la temperatura con un periodo de oscilación que coincide con el de estas ondas internas.

Medidas realizadas en 1960 por Lafond permitieron calcular la amplitud de estas oscilaciones de masas de agua, obteniendo valores entre los 0.60 y los 2.40 m. Estas ondas internas se propagaban a una velocidad de  $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  con una longitud de onda de unos 50 m [Uri83], aunque estos valores dependerán de las fluctuaciones particulares de la densidad.

Estas ondas internas pueden afectar a la propagación acústica, ya que por su origen, implican la existencia de una superficie de separación con un cambio considerable de densidad que varía en el tiempo, lo que provocará la refracción de la señal a medida que se propaga en el agua. Un efecto similar lo provocan las mareas, ya que también pueden alternar el perfil de velocidad del sonido y, por tanto, generar fluctuaciones en la señal acústica recibida debido a los cambios generados en la propagación [PBJ<sup>+</sup>02].

## A.4. Zonas de sombra

Las zonas de sombra son regiones del entorno donde no se encuentran rayos debido a la forma concreta del perfil de velocidad del sonido, la ubicación del emisor y las reflexiones impuestas por la superficie del mar y del fondo. Un ejemplo se puede encontrar en las regiones superior e inferior de la figura 3.5 (b), donde se representa la propagación en un canal acústico profundo. De este modo, si un receptor se encontrase por encima de este canal, en una región cercana a la superficie, ningún rayo incidiría en él y, por tanto, no se debería detectar ninguna señal, es decir, no hay intensidad acústica. No obstante, medidas realizadas en los años 40 del siglo pasado sí que muestran que existe cierta intensidad acústica en esta región, aunque con atenuaciones de 40 a 60 dB superiores a lo que se podría esperar en campo abierto, para frecuencias de 24 kHz [Com49].

Hay varios factores que explican que haya cierta intensidad acústica en esta región. Uno de ellos es la propia difracción que sufre la señal en la propagación, algo que sí contempla la teoría de modos normales y que es especialmente importante a bajas frecuencias, puesto que está directamente relacionada con la longitud de onda y el tamaño del canal donde se propaga. Si la longitud de onda de la señal que se propaga en el medio es mayor que la anchura del canal, parte de la energía se sale fuera de éste, pudiendo insonorizar la zona de sombra. Si la frecuencia es elevada, tal y como ocurrió con la utilizada en las pruebas referenciadas para la zona de sombra en [Com49], y asumiendo unos tamaños razonables para los canales, del orden de varias decenas de metros, éste no parece ser el origen principal de la energía que aparece en las zonas de sombra. Por ello, hay que tener en cuenta también posibles inexactitudes en el perfil de velocidad del sonido no medidas, y que pueden provocar que haya señal en zonas no contempladas por el trazado original que se está estudiando.

Además, en los procesos de rebotes en la superficie y en el fondo hay energía que sufre un proceso de *scattering* y que sale reflejada en varias direcciones originando reverberación, que tampoco está contemplada en los trazados de rayos, tal como se comentó en la sección 3.2.3. Esta contribución aumenta a medida que lo hace la frecuencia de la señal. Todas estas contribuciones pueden explicar la aparición de energía en esta zona de sombra, a pesar de que el trazado de rayos no la contempla.

## A.5. Cáusticas y zonas de convergencia

Una cáustica es un punto singular en un trazado de rayos, en el que tienen lugar intersecciones de numerosos rayos adyacentes debido a la forma del perfil de velocidad del sonido y la ubicación del emisor y el receptor, que deben estar dentro del canal acústico. La aparición de cáusticas es más común para canales acústicos profundos, y para propagaciones a varios kilómetros. En estos puntos, el cálculo de las pérdidas de transmisión a partir de la intensidad acústica puede dar lugar a error, debido a la gran convergencia de rayos,

proporcionando valores anormales de pérdidas de transmisión.

Por su parte, las zonas de convergencia son una particularización de las cáusticas para regiones cercanas a la superficie del mar. Tanto las cáusticas como las zonas de convergencia proporcionan altos valores de intensidad acústica en estas regiones, con aumentos de entre 10 y 20 dB respecto a lo esperado por la divergencia geométrica [Uri83].

## A.6. Corrientes y remolinos

El océano está sujeto al movimiento de las masas de agua, que se dividen en diferentes corrientes que se propagan a lo largo de todo el planeta. Este movimiento de masas de agua puede afectar de distintas maneras a la propagación acústica, si ésta tiene lugar en una zona donde estas corrientes son importantes. Las ondas acústicas son ondas mecánicas, y por tanto, se propagan gracias al medio material. Si este medio se está moviendo a su vez puede originar un desplazamiento Doppler de la señal transmitida de manera análoga al que sufriría por el movimiento de los transductores.

Por otra parte, en el medio subacuático pueden aparecer remolinos de gran tamaño en la columna de agua, que pueden provocar un cambio en la dirección seguida por la señal acústica. En un modelo de trazado de rayos bidimensional, esto equivaldría a la refracción de los rayos fuera del plano vertical de propagación [Mun80], pudiendo llegar a un plano completamente diferente al contemplado en la propagación. Para tener en cuenta este efecto habría que considerar un modelo de propagación tridimensional. Adicionalmente, estos remolinos pueden provocar cambios importantes en la distribución geográfica del perfil de velocidad del sonido en una determinada región, lo que causará fluctuaciones y variaciones a su vez de la propagación acústica, como cambios en la profundidad del eje acústico para el canal acústico profundo que pueden llegar a los cientos de metros [JZLW08]. Estos cambios en la propagación acústica provocarán a su vez variaciones importantes en las pérdidas de transmisión obtenidas en un receptor.





## Apéndice B

# Formulación de los algoritmos de posicionamiento

Los distintos algoritmos de posicionamiento estudiados en esta tesis se presentaron brevemente en la sección 4.4. En este apéndice se va a profundizar con un poco más de detalle en la formulación matemática de algunos de estos algoritmos.

### B.1. Trilateración esférica mediante linealización

Este método calcula la posición del nodo  $(x, y, z)$  a partir de la intersección de  $n$  esferas de radios conocidos  $r_i$ , que vienen dados por

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (\text{B.1})$$

donde  $(x_i, y_i, z_i)$  es el centro de cada esfera de radio  $r_i$ . En este problema concreto, los centros de las esferas serán los nodos superficiales, y los radios, las distancias medidas al nodo sumergido. Solamente son necesarios tres nodos superficiales de posiciones conocidas para localizar al nodo sumergido. En el caso de que hubiera más nodos superficiales y se dispusiera de las distancias medidas entre todos ellos y el sumergido, habría que resolver el sistema en grupos de tres nodos (tripletas), eligiendo una solución posteriormente mediante una media de los resultados o una ponderación [Roa05].

Para simplificar las ecuaciones dadas por (B.1) se asumen ciertas condiciones para los distintos nodos superficiales. Generalmente se hacen cero distintas coordenadas, asumiendo que  $x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0, y_2 = 0, z_2 = 0, z_3 = 0$ . Aplicando estas condiciones, la ecuación (B.1) para  $n = 1, 2, 3$  queda:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ r_2^2 &= (x - x_2)^2 + y^2 + z^2 \\ r_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Obteniendo entonces un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, cuya solución algebraica viene dada por (B.3)

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + x_2^2}{2x_2} \\ y &= \frac{r_1^2 - r_3^2 + y_3^2 + x_3^2 - 2x_3x}{2y_3} \\ z &= \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

Para un sistema de referencia genérico, es posible realizar una transformación consistente en una traslación y una rotación del sistema de referencia original para ubicarlo sobre el plano que forman las tres balizas, sin importar su posición. De esta manera, se puede aplicar la solución algebraica descrita anteriormente por la ecuación (B.3), y posteriormente deshacer el cambio de sistema, volviendo al original [Roa05].

La solución empleada en el algoritmo de trilateración esférica utilizado en esta tesis está basada sin embargo en la linealización de las ecuaciones por el método de la pseudoinversa, puesto que resulta un método genérico para cualquier número de nodos superficiales. Este método consiste en utilizar las ecuaciones que describen  $n$  esferas de radio  $r_i$  con centro en  $n$  nodos superficiales, de manera que se pueda plantear un sistema de ecuaciones linealizadas y ordenadas de forma matricial. De esta forma se puede aplicar una solución del tipo  $X = A^{-1} \cdot C$ .

Los  $n$  radios vienen dados por la ecuación (B.1). A partir de ésta se puede realizar la linealización combinando nodos superficiales y eliminando una ecuación, lo que permite realizar un cálculo más eficiente en tiempo de cómputo que otros métodos de linealización como el de la variable adicional, al reducir la dimensión del problema [Roa05].

Si a la ecuación (B.1) se le añaden los términos nulos  $(-x_j + x_j)$ ,  $(-y_j + y_j)$  y  $(-z_j + z_j)$  se obtiene:

$$r_i^2 = (x - x_j + x_j - x_i)^2 + (y - y_j + y_j - y_i)^2 + (z - z_j + z_j - z_i)^2 \quad (\text{B.4})$$

Agrupando términos en la ecuación anterior, se llega a

$$r_i^2 = [(x - x_j) - (x_i - x_j)]^2 + [(y - y_j) - (y_i - y_j)]^2 + [(z - z_j) - (z_i - z_j)]^2 \quad (\text{B.5})$$

Resolviendo los cuadrados y reorganizando los términos se obtiene la ecuación (B.6):

$$\begin{aligned} r_i^2 &= (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \\ &\quad - 2(x - x_j)(x_i - x_j) - 2(y - y_j)(y_i - y_j) - 2(z - z_j)(z_i - z_j) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Si ahora se agrupan los términos según:

$$r_j^2 = (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2 \quad (\text{B.7})$$

$$d_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (\text{B.8})$$

$$-2b_{ij} = -2(x - x_j)(x_i - x_j) - 2(y - y_j)(y_i - y_j) - 2(z - z_j)(z_i - z_j) \quad (\text{B.9})$$

siendo  $d_{ij}$  la distancia entre dos nodos superficiales y habiendo definido  $b_{ij}$  según (B.9). La ecuación (B.6) queda por tanto como

$$r_i^2 = r_j^2 + d_{ij}^2 - 2b_{ij} \quad (\text{B.10})$$

Despejando  $b_{ij}$  de la ecuación (B.10), se obtiene

$$b_{ij} = \frac{1}{2}(r_j^2 - r_i^2 + d_{ij}^2) \quad (\text{B.11})$$

E igualmente, despejando  $b_{ij}$  de la ecuación (B.9), se tiene que

$$b_{ij} = (x - x_j)(x_i - x_j) + (y - y_j)(y_i - y_j) + (z - z_j)(z_i - z_j) \quad (\text{B.12})$$

Igualando por tanto (B.11) y (B.12), y teniendo en cuenta que la coordenada  $z$  es conocida mediante un sensor de presión en el nodo sumergido, se llega finalmente a

$$(x - x_j)(x_i - x_j) + (y - y_j)(y_i - y_j) = \frac{1}{2}(r_j^2 - r_i^2 + d_{ij}^2) - (z - z_j)(z_i - z_j) \quad (\text{B.13})$$

para  $i = 1, 2, \dots, j - 1, j + 1, \dots, n$ . De esta manera, todos los términos con incógnitas quedan a la izquierda de la igualdad, y los términos conocidos, a la derecha.

En forma matricial, la ecuación (B.13) se puede expresar como  $A(X - X_1) = AX - AX_1 = B$ , donde las incógnitas están recogidas en la matriz  $X$ . Pasando las matrices conocidas a la derecha de la igualdad, se tiene que

$$AX = B + AX_1 \quad (\text{B.14})$$

donde  $B + AX_1 = C$ . Se obtiene entonces un sistema de ecuaciones lineales con dos incógnitas, donde si se particulariza para el caso  $j = 1$ , se obtiene:

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ \vdots \\ C_{1n} \end{pmatrix} \quad (\text{B.15})$$

La matriz  $A$  solo depende de la posición de los distintos nodos superficiales, por lo que puede ocurrir que existan determinadas ubicaciones donde el determinante de esta matriz sea nulo y por tanto no sea invertible, no pudiéndose resolver el sistema. Para solventar este problema se ha empleado una descomposición en valores singulares. Este método descompone cualquier matriz  $A$  de dimensiones  $M \times N$ , donde  $M \geq N$ , en el producto de tres matrices:

$$A = U \cdot S \cdot V^T \quad (\text{B.16})$$

donde  $U$  es una matriz  $m \times m$  con vectores columnas ortogonales,  $S$  es una matriz  $m \times n$  diagonal, y  $V$  es una matriz  $n \times n$  ortogonal. En forma matricial, queda

$$\begin{pmatrix} A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 & & \\ & \ddots & \\ & & w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V^T \end{pmatrix} \quad (\text{B.17})$$

Como la solución del sistema viene dada por  $X = A^{-1} \cdot C$ , calculando la inversa de  $A$  en la ecuación (B.17) y sustituyendo, se llega finalmente a

$$X = V \cdot \left[ \text{diag} \left( \frac{1}{w_j} \right) \right] \cdot U^T \cdot C \quad (\text{B.18})$$

donde hay que tener en cuenta que si  $w_j = 0$ , hay que reemplazar el elemento de la diagonal  $1/w_j$  por cero. De esta manera, se pueden obtener las coordenadas  $(x, y)$  del nodo sumergido conociendo la posición de los nodos superficiales y la distancia entre ellos, información conocida gracias al GPS, las distintas distancias entre las boyas y el nodo, conocidas gracias al proceso de medida y la medida de la profundidad del nodo sumergido, obtenida por el sensor de presión. En [Roa05] se puede obtener más información sobre otras aproximaciones al método de la trilateración esférica.

## B.2. Determinantes de Cayley-Menger

Dados tres puntos conocidos  $\mathbf{q}_i$  que actúan como balizas, donde  $\mathbf{q}_i = (x_i, y_i, z_i)$ , el objetivo es encontrar las coordenadas de otro punto  $\mathbf{m} = (x, y, z)$ , conociendo la distancia entre los puntos conocidos y dicho punto a localizar,  $r_i$ , con  $i = 1, 2, 3$ . En el caso particular del sistema de posicionamiento subacuático propuesto, los puntos conocidos serían los nodos superficiales equipados con GPS, y el punto a localizar, el nodo sumergido (AUV, ROV, etc.).

Para calcular la posición de  $\mathbf{m}$ , el primer paso consiste en calcular las coordenadas de su proyección ortogonal  $\mathbf{p}$  a la base del triángulo formado por los tres puntos conocidos  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)$ .

Para calcular las coordenadas del punto  $\mathbf{p}$  se hace uso de las coordenadas baricéntricas descritas en [MLBD02], donde se demuestra que la posición de un punto  $\mathbf{p}$  respecto a los vértices de un polígono de  $N$  lados  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N)$  se puede expresar como

$$\mathbf{p} \cdot \sum_{j=1}^N w_j = \sum_{j=1}^N w_j \cdot \mathbf{q}_j \quad (\text{B.19})$$

donde  $w_j$  son unas constantes de ponderación que se obtienen a partir de

$$w_j = A(\mathbf{q}_{j-1}, \mathbf{q}_j, \mathbf{q}_{j+1}) \cdot \prod_{k \notin \{j, j+1\}} A(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k, \mathbf{p}) \quad (\text{B.20})$$

siendo  $A(\mathbf{q}_{j-1}, \mathbf{q}_j, \mathbf{q}_{j+1})$  y  $A(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k, \mathbf{p})$  las áreas con signo del triángulo formado por los vértices  $(\mathbf{q}_{j-1}, \mathbf{q}_j, \mathbf{q}_{j+1})$  y  $(\mathbf{q}_{k-1}, \mathbf{q}_k, \mathbf{p})$  respectivamente. El signo de un triángulo formado por estos vértices se calcula de la siguiente forma: si el punto  $\mathbf{q}_j$  está a la derecha de la línea que une los vértices  $\mathbf{q}_{j-1}$  y  $\mathbf{q}_{j+1}$  el signo del área es positivo, y si se encuentra a la izquierda el signo es negativo. Lo que representa la expresión (B.20) es que la constante correspondiente a cada vértice puede obtenerse como el producto del área del triángulo formado por el vértice actual y los dos vértices adyacentes a él, y las áreas de los triángulos interiores formados por el punto  $\mathbf{p}$  y los demás vértices, excluyendo las áreas que incluyan como vértice al punto  $\mathbf{q}_j$ . Como ejemplo, el peso  $w_j$  correspondiente al vértice  $\mathbf{q}_j$  en el polígono de cinco lados de la figura B.1 se obtendría como  $w_j = A(\mathbf{q}_{j-1}, \mathbf{q}_j, \mathbf{q}_{j+1}) \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ .

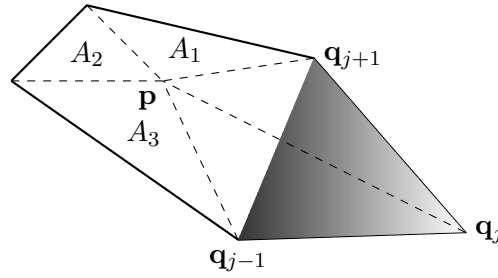


Figura B.1: Obtención de la constante  $w_j$  en las coordenadas baricéntricas generalizadas

En el caso particular del triángulo que se obtiene en la figura 4.11, las constantes  $w_j$  obtenidas para cada vértice son:

$$\begin{aligned} w_1 &= A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \cdot A_1 \\ w_2 &= A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \cdot A_2 \end{aligned} \quad (\text{B.21})$$

$$\begin{aligned} w_3 &= A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \cdot A_3 \\ \sum w &= A^2(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \end{aligned} \quad (\text{B.22})$$

donde  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  son las áreas formadas por los triángulos con vértices en los puntos  $(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{p})$ ,  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{p})$  y  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{p})$ , respectivamente. Teniendo en cuenta estos resultados y aplicando la ecuación (B.19), el punto  $\mathbf{p}$  puede expresarse como

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \frac{A_1 \cdot \mathbf{q}_1 + A_2 \cdot \mathbf{q}_2 + A_3 \cdot \mathbf{q}_3}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} = \frac{A_1 \cdot \mathbf{q}_1 + A_2 \cdot (\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_1) + A_3 \cdot (\mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_1)}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \\ &= \mathbf{q}_1 + \frac{A_2}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \mathbf{v}_1 + \frac{A_3}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \mathbf{v}_2 \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

donde  $\mathbf{v}_1 = \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1$  y  $\mathbf{v}_2 = \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_1$ . A continuación hay que calcular por tanto el valor de las áreas  $A_2$  y  $A_3$ . Estas áreas se pueden obtener multiplicando el área del triángulo coincidente en  $\mathbf{m}$  por el coseno del ángulo existente entre ambos triángulos:

$$\frac{A_2}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} = \frac{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \cos(\phi_{24}) = \frac{-\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}}{\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \cos(\phi_{24}) \quad (\text{B.24})$$

$$\frac{A_3}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} = \frac{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m})}{A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \cos(\phi_{34}) = \frac{\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m})}}{\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \cos(\phi_{34}) \quad (\text{B.25})$$

donde el signo negativo de la primera ecuación se debe al signo del área  $A_2$ . Aplicando las propiedades de los determinantes de Cayley-Menger [Rui11], se obtiene que

$$\cos(\phi_{24}) = \frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}{\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})} \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \quad (\text{B.26})$$

$$\cos(\phi_{34}) = \frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m})}{\sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m})} \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \quad (\text{B.27})$$

Sustituyendo las ecuaciones (B.24), (B.25), (B.26) y (B.27) en la ecuación (B.23), se llega a

$$\mathbf{p} = \mathbf{q}_1 - \frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \mathbf{v}_1 + \frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m})}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \mathbf{v}_2 \quad (\text{B.28})$$

Una vez obtenido el punto  $\mathbf{p}$  se puede calcular  $\mathbf{m}$  como [TR05]

$$\mathbf{m} = \mathbf{p} \pm \frac{h}{\|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2\|} (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2) \quad (\text{B.29})$$

siendo  $h$  la altura del tetraedro. Como el volumen  $V$  de un tetraedro de vértices  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})$  puede obtenerse como  $\frac{1}{3} A_{base} h$ , utilizando las propiedades de los determinantes de Cayley-Menger se puede calcular la altura como

$$h = \frac{3V}{A_{base}} = \sqrt{\frac{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)}} \quad (\text{B.30})$$

Adicionalmente, se tiene que

$$\|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2\| = \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} \quad (\text{B.31})$$

Si se define  $\mathbf{v}_3 = (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)$ , sustituyendo en la ecuación (B.29) el valor de  $\mathbf{p}$  dado en (B.28) y teniendo en cuenta la ecuación (B.31), el punto  $\mathbf{m}$  se puede obtener como

$$\begin{aligned} \mathbf{m} = & \mathbf{q}_1 - \frac{1}{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3)} (-D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_3, \mathbf{m}) \cdot \mathbf{v}_1 \\ & + D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3; \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{m}) \cdot \mathbf{v}_2 \pm \left( \sqrt{D(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{m})} \right) \cdot \mathbf{v}_3) \end{aligned} \quad (\text{B.32})$$

### B.3. Escalado métrico multidimensional

El algoritmo MDS permite obtener una configuración geométrica de los nodos a posicionar en el menor número de dimensiones posible, cuando todo lo que se conoce es una medida de la relación existente entre ellos, en este caso la distancia, almacenadas en una matriz de datos que da una idea de la similitud existente en un conjunto de elementos [Mar06].

Existen dos grupos de técnicas MDS: el MDS métrico o clásico, introducido por Torgerson [Tor52], y el denominado no métrico. El MDS métrico asume que la información

contenida en la matriz de proximidad presenta propiedades métricas como son las distancias medidas entre objetos. Considerando dos objetos  $i, j$  y la distancia entre ellos  $d_{ij}$ , estas propiedades métricas son:

- Reflexividad:  $d_{ij} = 0, \forall i = j$ .
- Desigualdad triangular:  $d_{jq} \leq d_{ij} + d_{iq}$ .
- Simetría:  $d_{ij} = d_{ji}$ .

Esta técnica permite obtener la configuración geométrica de un grupo de nodos, a partir de las distancias medidas entre ellos. De manera general, para un sistema formado por un número  $Q$  de nodos, la distancia  $d_{ij}$  entre el nodo  $i$  y el  $j$  se puede expresar como

$$d_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (\text{B.33})$$

donde  $i, j = 1, 2, \dots, Q$ . La solución clásica a este sistema vendría dada por un método de trilateración esférica, como el presentado por ejemplo en la sección B.1. De manera análoga a este método, para linealizar este sistema se emplea un punto  $R$  como referencia, de coordenadas  $(x_R, y_R, z_R)$ . Este punto  $R$  se puede corresponder con cualquiera de los nodos del sistema, o en general, con cualquier otro punto con el que se puedan obtener relaciones espaciales.

Introduciendo los términos nulos  $(-x_R + x_R)$ ,  $(-y_R + y_R)$  y  $(-z_R + z_R)$  en la ecuación (B.33), se obtiene

$$d_{ij}^2 = (x_i - x_R + x_R - x_j)^2 + (y_i - y_R + y_R - y_j)^2 + (z_i - z_R + z_R - z_j)^2 \quad (\text{B.34})$$

Reagrupando esta ecuación, queda

$$\begin{aligned} d_{ij}^2 &= (x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 + (z_i - z_R)^2 + (x_j - x_R)^2 + (y_j - y_R)^2 + (z_j - z_R)^2 \\ &\quad - 2(x_i - x_R)(x_j - x_R) - 2(y_i - y_R)(y_j - y_R) - 2(z_i - z_R)(z_j - z_R) \end{aligned} \quad (\text{B.35})$$

Si se define el producto de puntos de la ecuación  $b_{ij}$  como

$$b_{ij} = (x_i - x_R)(x_j - x_R) + (y_i - y_R)(y_j - y_R) + (z_i - z_R)(z_j - z_R) \quad (\text{B.36})$$

entonces se puede reescribir la ecuación (B.35) como

$$d_{ij}^2 = d_{iR}^2 + d_{jR}^2 - 2b_{ij} \quad (\text{B.37})$$

Y por lo tanto, el producto de puntos  $b_{ij}$  se puede expresar como

$$b_{ij} = \frac{1}{2}(d_{iR}^2 + d_{jR}^2 - d_{ij}^2) \quad (\text{B.38})$$

Para un sistema formado por  $Q$  nodos, se puede definir una matriz de coordenadas  $X$ , de dimensiones  $Q \times D$ , donde  $D$  es la dimensión del espacio considerado, de la forma dada en (B.39).

$$X = \begin{pmatrix} x_1 - x_R & y_1 - y_R & z_1 - z_R \\ x_2 - x_R & y_2 - y_R & z_2 - z_R \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_Q - x_R & y_Q - y_R & z_Q - z_R \end{pmatrix} \quad (\text{B.39})$$

Si  $D = 3$ , que será la situación habitual, cada columna de esta matriz  $X$  representa las coordenadas de un nodo respecto del punto de referencia considerado, mientras que cada una de las filas representa a cada uno de los nodos del sistema. Teniendo en cuenta la definición de la matriz  $X$  dada en (B.39) y la del producto de puntos dada en (B.36), se puede construir una matriz producto de puntos  $B$  según

$$\begin{aligned} B &= X \cdot X^T = \begin{pmatrix} x_1 - x_R & y_1 - y_R & z_1 - z_R \\ x_2 - x_R & y_2 - y_R & z_2 - z_R \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_Q - x_R & y_Q - y_R & z_Q - z_R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_R & x_2 - x_R & \cdots & x_Q - x_R \\ y_1 - y_R & y_2 - y_R & \cdots & y_Q - y_R \\ z_1 - z_R & z_2 - z_R & \cdots & z_Q - z_R \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1Q} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{Q1} & b_{Q2} & \cdots & b_{QQ} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.40})$$

Ahora bien, cada uno de los elementos  $b_{ij}$  de la matriz  $B$  expresada en la ecuación (B.40) también se puede calcular según (B.38). Por lo tanto, a partir del cálculo de las distancias euclídeas entre los distintos nodos es posible calcular la matriz  $B$ , conociendo el punto de referencia  $R$ . Según Torgerson, el mejor punto de referencia viene dado por el centroide del poliedro cuyos vértices están definidos por cada uno de los nodos del sistema [Tor52]. Eso es así puesto que si estas distancias están contaminadas con ruido aleatorio, al elegir el centroide estos errores tienden a cancelarse. Si se realiza una traslación de la matriz  $X$  desde su punto de referencia al centroide del sistema, se obtiene una nueva matriz  $X^*$  que se calcula como

$$X^* = X - \frac{1}{Q} \cdot 1_{QQ} \cdot X \quad (\text{B.41})$$

Por lo tanto, la matriz producto de puntos asociada a este cambio de coordenadas,  $B^*$ , se puede expresar como

$$\begin{aligned} B^* &= X^* \cdot (X^*)^T = \left( X - \frac{1}{Q} \cdot 1_{QQ} \cdot X \right) \left( X - \frac{1}{Q} \cdot 1_{QQ} \cdot X \right)^T \\ &= X \cdot X^T - \frac{1}{Q} X \cdot X^T \cdot 1_{QQ} - \frac{1}{Q} \cdot 1_{QQ} X \cdot X^T + \frac{1}{Q^2} 1_{QQ} \cdot X \cdot X^T \cdot 1_{QQ} \end{aligned} \quad (\text{B.42})$$



Teniendo en cuenta que  $B = X \cdot X^T$ , la ecuación anterior se puede expresar como

$$B^* = B - \frac{1}{Q}B \cdot 1_{QQ} - \frac{1}{Q} \cdot 1_{QQ}B + \frac{1}{Q^2}1_{QQ} \cdot B \cdot 1_{QQ} \quad (\text{B.43})$$

donde cada uno de los elementos de la matriz  $B^*$  se definen como

$$b_{ij}^* = -\frac{1}{2} \left[ b_{ij} - \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q b_{iq} - \frac{1}{Q} \sum_{l=1}^Q b_{lj} + \frac{1}{Q^2} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^Q b_{mn} \right] \quad (\text{B.44})$$

Teniendo en cuenta (B.38), esta ecuación se puede escribir como

$$b_{ij}^* = -\frac{1}{2} \left[ d_{ij}^2 - \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q d_{iq}^2 - \frac{1}{Q} \sum_{l=1}^Q d_{lj}^2 + \frac{1}{Q^2} \sum_{m=1}^Q \sum_{n=1}^Q d_{mn}^2 \right] \quad (\text{B.45})$$

donde  $d_{ij}$ ,  $d_{iq}$ ,  $d_{lj}$  y  $d_{mn}$ , con  $i, j, l, m, n, q = 1, 2, \dots, Q$ , representan la distancia entre los distintos nodos que forman el sistema. La operación descrita en (B.45) se denomina doble centrado, y consiste en que a cada elemento de distancia se le resta la distancia media de la fila y la distancia media de la columna en la cual se encuentra, y se suma la media cuadrática de todas las distancias.

Una vez que se obtienen los elementos de la matriz  $B^*$  de la forma dada en (B.45), se puede calcular la matriz de coordenadas  $X^*$  mediante su factorización. Para ello se puede emplear el método de descomposición en valores singulares, obteniéndose entonces

$$B^* = U \cdot S \cdot U^T \quad (\text{B.46})$$

siendo  $S$  una matriz diagonal que contiene los autovalores singulares, mientras que las columnas de  $U$  representan los autovectores asociados a aquellos autovalores distintos de cero. Puesto que la matriz  $S$  es diagonal, (B.46) se puede escribir finalmente como

$$B^* = U \cdot S^{1/2} \cdot S^{1/2} \cdot U^T = (U \cdot S^{1/2}) \cdot (U \cdot S^{1/2})^T \quad (\text{B.47})$$

Teniendo en cuenta que  $B^* = X^* \cdot (X^*)^T$ , la matriz  $X^*$  se puede obtener entonces como

$$X^* = U \cdot S^{1/2} \quad (\text{B.48})$$

Por lo tanto, para un sistema de coordenadas tridimensional, seleccionando las tres primeras columnas de  $X^*$  se obtiene la estimación de las coordenadas de cada nodo con respecto al centroide de la figura que forman. Solo restaría realizar de nuevo una transformación del sistema de coordenadas para obtener las posiciones respecto al sistema de referencia original. Este proceso se realiza mediante una matriz de transformación  $T_r$ , que contempla dos procesos de rotaciones y uno de traslación [Mar06], obteniéndose finalmente que

$$X = X^* \cdot T_r \quad (\text{B.49})$$



# Apéndice C

## Extended abstract and conclusions (English version)

### C.1. Introduction

#### C.1.1. Motivation

Underwater acoustic positioning systems have experienced a growing interest in the last decades. Its importance resides in the fact that knowing the position of the system nodes is crucial in different applications, such as sensor networks or navigation.

As opposed to outdoors environments, where GPS is a common solution with a good precision, in underwater environments electromagnetic signals cannot propagate in good conditions further than few meters under the sea surface. For that reason, GPS can be used to obtain the position of some surface nodes (boats or buoys), but acoustic signals are the most versatile technology under the sea. Since 1970, several underwater positioning systems have been proposed: from the ones that only use acoustic signals, to modern positioning systems that rely on data fusion from different technologies, like acoustic signals, GPS or INS (Inertial Navigation Systems).

In sonar systems or positioning systems based on distance estimation between different nodes, the use of Code-Division Multiple-Access techniques (CDMA) provide a more accurate estimation of the time-of-flight (TOF) of the acoustic signal, from which the distance can be obtained. CDMA techniques have been used in airborne environments as well as some sonar applications, but their use in underwater positioning systems is not extensive.

In this work, an underwater positioning system based on data fusion from coded acoustic signals and GPS is proposed and studied using an underwater acoustic propagation model. Since performing a study of the behavior of these system based solely on real tests is

not practical due to time and environmental restrictions, a propagation model have been developed, considering the main effects that take place in this complex medium. Using this propagation model, an evaluation of the performance of the positioning system under several environmental conditions have been performed, whereas different coding schemes and positioning algorithms have also been tested.

### C.1.2. Background

Positioning systems in underwater environments is a research field with growing interest in the last decades, due to the importance of knowing the position for one or different nodes. These nodes could be some sensors in an underwater acoustic network, or some Autonomous Underwater Vehicle (AUV) that is navigating through the medium. In all these cases, it is crucial to know the position of these nodes. Whereas the position of surface nodes like boats or buoys can be easily obtained by means of the GPS, electromagnetic signals do not propagate well underwater, so a different approach is needed.

Traditionally, underwater acoustic positioning systems haven been classified in two categories:

- **Long Baseline (LBL)**: these systems can be considered the equivalent of GPS in underwater environments. They use a set of underwater beacons deployed at fixed and known positions, and they measure at least three ranges to the mobile node that needs to be located. These beacons are spread over distances between several hundred meters and few kilometers. LBL systems usually have good accuracy in the results, but a costly calibration procedure is needed. LBL systems were an early solution to surface positioning in the 1970 decade, where there were no GPS yet [SPMD76], and later on, they were used to obtain the position of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) [ALBM95]. More recently, different systems appeared that replaced the submerged fixed beacons by Autonomous Surface Crafts (ASC) [SMC08].
- **Short Baseline (SBL)** and **Ultra-short Baseline (USBL)**: these systems are based on the phase difference in the arrival times. To that end, they use an array of several receivers that allows the calculation of the angle of arrival as well as the arrival time. The distances for the different elements of the array are shorter in the USBL than in the SBL systems, but they are basically the same kind of system. They are easy to mount, since they can be deployed in the hull of a boat and not at the sea bottom, but they also need a costly calibration procedure and the boat needs to follow the submerged node that wants to be located. Theses systems have been used in applications of homing [BLV<sup>+</sup>95], in addition to positioning systems for AUV [MIN00].

In the last years, data fusion has become an interesting approach to positioning systems, since it obtains more robust systems by means of using the best features of different

technologies, such as GPS, Inertial Navigation Systems (INS), acoustic signals or even camera images.

That way, several positioning systems can be found that use at least two different technologies, such as GPS and acoustic signals [You92]. One example of this kind of systems is shown in Figure C.1. Another positioning systems use acoustic signals with INS [MOSV07], GPS with INS and a Doppler Velocity Log (DVL) [LCR10], or there are more complex systems that use acoustics, INS and GPS [WMPH09].

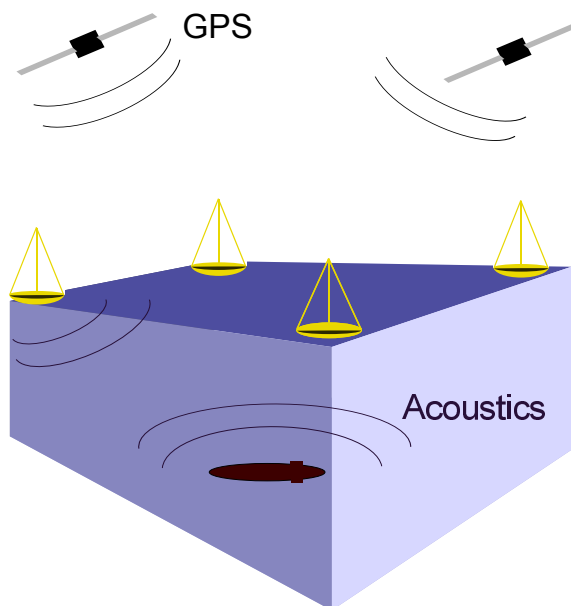


Figure C.1: Positioning system based on GPS and acoustic signals

In applications like positioning systems and sonar, where a precise estimation of the arrival times is needed to calculate the distance between two or more nodes with low errors, a useful solution consist in the use of CDMA [HL93]. Choosing orthogonal codes also allows multiple signals to arrive at the same time at one receiver, where this receiver is able to separate and detect the different received signals, which is particularly useful in positioning systems [Aus94]. Moreover, CDMA techniques provide higher immunity against noise [LCF97].

Up to date, the use of CDMA techniques in underwater environments has been mainly focused on communications, using additional components in the receiver such as a Rake receiver [SPS<sup>+</sup>99] or a PPC receiver [ZHDL10] to improve the results. Nevertheless, a study of the performance of different coding schemes in this medium and its application on positioning systems is yet to be conducted.

Underwater medium is a challenging environment due to a high variability, both spatial and temporal. The development of any system working with acoustic signals sent underwater should be preceded by an extensive study of the physical phenomena that take place in this

medium, and how these phenomena affect the system performance.

In order to study the influence of the underwater channel in acoustic signals, several underwater acoustic propagation models have been developed through the last five decades, based on different techniques. These techniques try to resolve the Helmholtz equation (C.1) under different considerations, where  $\phi$  is the acoustic pressure and  $k$  is the wavenumber.

$$\nabla^2\phi + k^2\phi = 0 \quad (\text{C.1})$$

That way, models that are not based on the same technique have a different range of validity and applicability. These models are very important to study underwater systems, because of time and economical restrictions to perform field experiments in this medium. The most relevant techniques used to model underwater acoustic propagation are:

- **Ray tracing:** this technique assumes that the acoustic signal is represented by several rays, which are perpendicular to the wave fronts. Models based on ray tracing are usually fast with regards to computing time, they allow to set the directionality of the source, they can be used in range dependent environments. Additionally, they are useful to study acoustic signals with a considerable bandwidth. However, they have problems with diffraction effects and propagations with heavy interaction with the bottom, and they are restricted to frequencies greater than 500 Hz [Ett03]. Some of the most known and complete models based on ray tracing are Bellhop [PB87], RAY [BSDF92], GRAB [WK96] and PlaneRay [HYBD08].
- **Normal modes:** normal modes models consider a two-dimensional cylindrical geometry to solve (C.1) in a stratified medium, where sound speed and water density only vary with depth. Using this technique, acoustic pressure depends on the normal modes, where these modes are directly dependent on frequency. Thus, they are not recommended for high frequency signals (usually higher than 500 Hz) because of high computational times. Some models based on normal modes are SNAP [JF79], COUPLE [Eva83] and KRAKEN [Por10].
- **Parabolic equation:** this technique considers a reference wavenumber  $k_0$  to solve (C.1), and assumes a far field approximation along with smooth variations of the acoustic pressure. This method is specially useful to obtain the acoustic propagation for low frequency signals in range dependent environments at high distances (several kilometers), but it is only valid for low aperture angles and low frequencies due to a high computational cost. Some of the models based on the parabolic equation method are PESOGEN [NPDT84], RAM [Col99] and MMPE [Smi03].
- **Multipath expansion:** this method is related to normal modes, assuming also a cylindrical geometry and obtaining an acoustic pressure that depends on a sum of pressures, considering four basic propagation paths: a direct path, a bottom reflected path, a surface reflected path and a bottom and surface reflected path. This method

calculates acoustic pressure better than ray tracing in singular points such as caustics and shadow zones, but only works for harmonic waves and it is computationally heavier than ray tracing. This technique was proposed by Weinberg [Wei75], and there are not many works based on it.

- Wavenumber integration: this technique is also based on normal modes formulation, and it considers a stratified and range independent medium. This way, the wavenumber only depends on depth, and a Hankel transformation can be applied to (C.1). The acoustic pressure is obtained as an integral that has to be resolved for all the layers of the stratified medium, so this technique is useful for small environments. The most common way to resolve this integral is the Fast Field technique, so these models are also known as FFP (Fast Field Programs) [DD80]. However, the most known model based on this technique is SAFARI, which uses a different approximation [Sch88].

The principal features of these techniques have been summarized in Table C.1. Depending on the particular environment to consider, and also the frequency and bandwidth properties of the acoustic signal to be transmitted underwater, some techniques are better suited (✓) than others (✗), whereas some of them can be applied with some restrictions (≈).

Technique	High-frequency (> 500 Hz)	Range-dependent
Ray-tracing	✓	✓
Normal mode	≈	≈
Parabolic equation	✗	≈
Multipath expansion	✓	✗
Fast field	✓	✗

**Table C.1:** Comparison of the main properties of the different modeling techniques

### C.1.3. The aims of this thesis

The main objective of this thesis is to propose an underwater positioning system based on data fusion from coded acoustic signals, a radiofrequency link and GPS, and to study the behavior of this system using a new propagation model. This main objective can be further described through a set of partial ones:

- *Study of the underwater medium as a channel for the transmission of acoustic signals.* Underwater medium is recognized as one of the most challenging environments to work with. An study of the phenomena that affect the acoustic propagation through this medium is crucial to understand which effects are the most important, and how they modify the properties of acoustic signals.

- *Development of a new underwater acoustic propagation model.*

As it was stated above, there are several propagation models based on different techniques. Since the frequency of the signals that have been used in this work are of tens of kiloHertz and they have a considerable bandwidth, ray tracing is the best suited technique. However, not all the models based on ray tracing were available, and considering the ones that were available, none of them included the physical properties required in this work, or they were not valid for the signal frequencies that were going to be used. For that reason, a new underwater acoustic propagation model has been developed in this thesis, that considers the main phenomena of underwater channels, and it is valid for a wide range of environmental conditions. That way, the propagation model can be used in other applications apart from the one considered in this work.

- *Study of the performance of CDMA techniques in underwater environments.*

CDMA techniques have been used mainly in sonar and communications in underwater environments, but their use in underwater positioning system is limited. An study of the behavior of two different coding schemes (Complementary Set of Sequences and Kasami) is undertaken in this thesis. This study will provide a comparison of the performance of these coding schemes for different configurations, and it will allow to choose the coding scheme that is better suited for most underwater environments.

- *Proposal of an underwater positioning system based on data fusion.*

An underwater positioning system based on data fusion of GPS signals, a radiofrequency link and acoustic coded signals is proposed in this thesis. This system takes advantage of GPS signals to obtain the position of some surface nodes (boats or buoys), which are equipped with a radiofrequency link and an acoustic transducer. The measurement procedure allows to obtain the position of a submerged node in one of the surface nodes, which will usually be the boat that carries all the equipment and crew, using only two acoustic emissions in the medium. Additionally, this measurement procedure along with the use of CDMA will allow to easily extend this positioning system to several underwater nodes.

- *Study of the behavior of the positioning system.*

Since the underwater medium is a challenging environment due to a high temporal and spatial variability, an study of the behavior of the proposed positioning system is undertaken considering different and realistic environmental conditions, which are replicated using the propagation model. A comparison of different positioning algorithms is performed, which will be useful to choose the best one in order to obtain the position of a submerged node with the lowest error.

- *Experimental validation.*

A series of simulations and experimental tests have been carried out to validate the underwater acoustic propagation model, as well as the feasibility of using CDMA



techniques in environments with a strong reberveration and multipath component. In addition, a first stage for the final positioning system have been also tested.

## C.2. The underwater acoustic propagation model

In this section a new underwater acoustic propagation model based on ray-tracing is presented. This model considers the main phenomena that takes place in underwater acoustic propagation, such as geometrical spreading, absorption and rebounds with the sea surface and sea bottom, and it also includes the fading and Doppler spread caused by a moving sea surface, due to wind speed at the surface. By means of the equations employed in the model to describe the different phenomena, the propagation model has a wide range of valid inputs. That way, although in the text sea surface and sea bottom will be referred, the model is also valid for fresh water environments, such as rivers and reservoirs. In addition, the propagation model is range-dependent since a bathymetry profile can be considered.

This chapter is organized as follows. The first section describes the general functioning of the propagation model. Next, the main parameters of the model, which are the sound speed, transmission loss and the fading and Doppler spread caused by wind speed are revised. Finally, a validation of the propagation model by means of some experimental results in a real environment is presented.

### C.2.1. General description of the model

The underwater acoustic propagation model has been programmed in a Matlab environment, since no real time applications are required, and also due to the simplicity the Matlab environment provides. The model considers the usual phenomena such as geometrical spreading, absorption and rebound losses both at the sea surface and sea bottom, as well as fading and Doppler spread caused by wind speed in the surface. Other ray-tracing programs were not well suited for this study, as they use a set of equations whose range of validity were not appropriate, they do not include some effects that could be important to consider in signal processing systems, or they are limited to specific environments like shallow waters.

The block diagram of the programmed algorithm computations are shown in the Figure C.2. The algorithm needs both environmental inputs and some information about the system to perform the ray tracing in the environment. The environmental inputs are:

- Water density,  $\rho_w$ .
- Bottom density,  $\rho_b$ .
- Sound speed at bottom material,  $c_b$ .

- Temperature in all the water column,  $T$ .
- Salinity,  $S$ .
- pH.
- Latitude.
- Signal-to-Noise ratio,  $SNR$ .
- Bathymetry profile.
- Wind speed,  $v_w$ .

And the inputs about the system are:

- The distance between emitter and receiver,  $d$ .
- The emitter depth,  $z_e$  and the receiver depth,  $z_r$ .
- The aperture angle of the emitter,  $\theta$ , and its frequency response.
- Signal frequency,  $f$ .
- Sampling frequency,  $f_s$ .

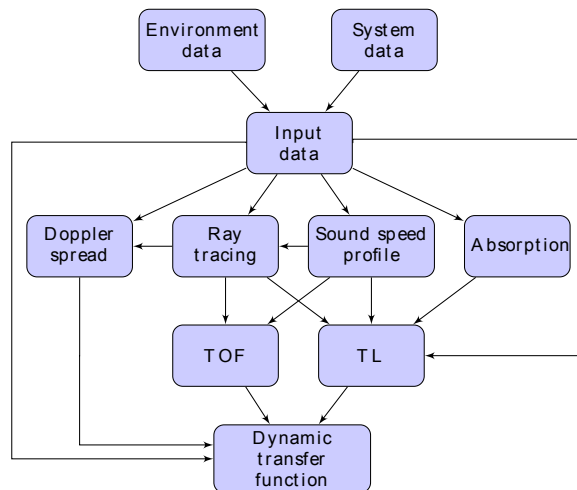


Figure C.2: Block diagram of the propagation model

With all these data, the first step is to calculate the sound speed profile and to perform a ray-tracing in the defined environment. This ray-tracing is two-dimensional, in the vertical plane that connects the emitter with the receiver.

To compute the ray tracing, the water column is assumed to be stratified in layers of a custom depth. In each of these layers, sound speed is considered to be constant, but its

value can change from one layer to the next. Thus, a ray path will follow a straight line within one layer, but when it hits the next one, the sound speed value changes and so does the angle of the ray path, according to Snell's Law. This change in the angle causes the curvature of the ray as a consequence of the sound speed profile.

Large values for the layers depth (in the order of meters) will result in large sections of water where the sound speed value is not changing as it should. This effect will cause an inaccuracy in the estimation of the ray paths. However, small values for the layers depth (in the order of millimetres) will result in higher computation times, as the model needs to calculate the ray paths in more sections. Thus, the optimal value is a trade-off between accuracy and computational time, where a value of 10 cm is usually employed in the model. This value has been obtained by using different layer depths in the same environment and calculating the computing time in each case. Naturally, the computational cost of the model will also increase with the size (depth and range) of the considered environment.

A large number of rays are launched at the emitter between custom angles. The number of rays depends on the environment. For environments with a strong multipath component due to long propagation (such as hundreds of meters) in shallow water scenarios with a bottom depth of few meters, the model needs a large number of rays (typically between 600 and 700) in order to describe all the possible paths. If the multipath component is not that strong, fewer rays can be used.

These rays will propagate through the medium, bouncing off the sea-surface and the bottom; the sea surface is considered to be flat for computing the ray-tracing, although the movement of the surface is taken into account later for the Doppler spread and fading of the reflected waves. A bathymetry profile can be included, as a depth value of the bottom every certain meters. The shorter the distances between the bottom depth values, the more accurate the bathymetry profile is, but at the expense of increasing the computational cost.

The rays will reach the receiver end at certain times. The propagation times for these rays are computed in each layer taking into account the sound speed value in the layer, and then, these times are accumulated. Once all the rays have reached the receiver end, the eigenrays are detected. The model identifies an eigenray when the receiver is placed between two rays with the same properties of rebounds at the surface and the bottom, as shown in Figure C.3. In this figure, the rays in blue color (solid lines) will provide an eigenpath, whereas the rays in black (dashed lines) will not. Then, it interpolates the propagation time and transmission loss that would have a ray hitting the exact position of the receiver.

With this information and the previous data, the propagation times (time-of-flight, TOF) can be obtained. The absorption coefficient is calculated from the input data in all the water column, whereas the transmission loss (TL) equations use this coefficient and the information obtained with the ray-tracing to calculate the loss values for all the rays. Doppler spread is calculated for the rays that bounce off the sea surface, and lastly a dynamic transfer function is computed by using the internal Matlab function *rayleighchan*.

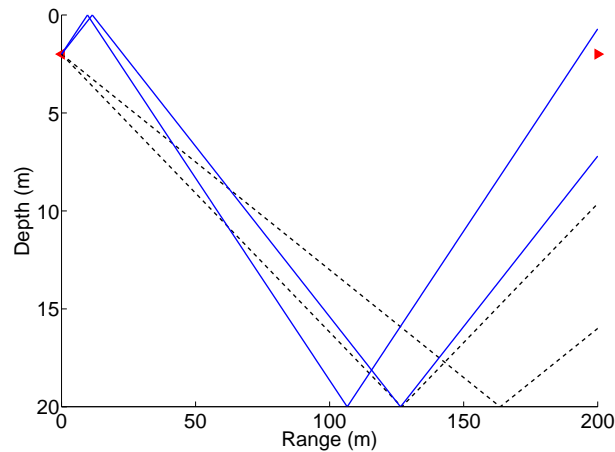


Figure C.3: Eigenpaths identification

This function takes as inputs the sampling frequency and transmission loss, Doppler spread and delay times for the eigenrays, and it provides a received signal with Rayleigh fading amplitude and random phase shifts for the surface reflected signals.

### C.2.2. Sound speed

Since the theoretical formula for the sound speed is not easy to compute in real environments due to its dependence on temperature, pressure and salinity [KFCS00], several semiempirical equations have been proposed through the last decades, in order to compute sound speed based on these three variables.

In this work, the formula by Chen and Millero (C.2) is used to obtain the sound speed, because of its wide range of valid inputs for these variables [Lab13], which is broader than other sound speed equations like the ones by Wilson [Wil60], Anderson [And71], Del Grosso [Gro74] or Mackenzie [Mac81]. This equation can be used for water temperature between 0°C and 40°C, pressures between 0 bar and 1000 bar and salinities between 0 ‰ and 40 ‰. Thus, this equation can be used for both fresh and sea water, while it can be also applied in almost all kind of scenarios. The values for the functions  $C_w$ ,  $A$ ,  $B$  and  $D$  can be consulted in [Lab13].

$$\begin{aligned}
 c(S, T, P) &= C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} \\
 &+ D(T, P)S^2 \quad (m \cdot s^{-1})
 \end{aligned}
 \tag{C.2}$$

Sound speed is computed in each layer, knowing the temperature profile and salinity for the water column. Pressure is obtained using the Leroy-Parthiot equation [LP98], which provides a depth to pressure conversion. A sound speed profile is then obtained, and this way the model can be applied both in shallow and deep waters.

### C.2.3. Transmission Loss

The propagation of acoustic waves in water has three main causes of energy loss: geometrical spreading, absorption and rebounds in the sea surface and the bottom. This transmission loss is computed for each ray, taking into account the followed path.

The expansion of the acoustic wave in the medium causes the geometrical spreading,  $TL_{geo}$ . There are two types of spreading, depending on the geometry of the channel: cylindrical and spherical spreading. The acoustic waves tends to propagate spherically, but if these waves are too constrained, like in a very shallow water environment, where the range between emitter and receiver are several orders of magnitude higher than depth, then it can be considered that they propagate cylindrically, losing less energy in the process. The geometrical spreading loss is shown in (C.3), where  $k$  is a constant whose value is 10 for cylindrical spreading and 20 for spherical spreading, and  $r$  is the distance traveled by the ray in meters [Uri83].

$$TL_{geo} = k \cdot \log r \quad (dB) \quad (C.3)$$

The absorption term,  $TL_{abs}$ , takes into account the part of the energy of the wave that is transferred to the medium as heat. This energy loss depends on the total distance traveled by the ray and the absorption coefficient,  $\alpha$ , following (C.4):

$$TL_{abs} = \alpha r 10^{-3} \quad (dB) \quad (C.4)$$

The absorption coefficient can be computed by means of different semiempirical equations. In this work the one by Francois and Garrison has been used [FG82a, FG82b], as it is shown in (C.5), because of the range of valid inputs frequencies, ranging from 200 Hz to 1 MHz. This equation is especially useful when working with high-frequency signals (tens of kHz), such as the ones used in this thesis, as opposed to Thorp equation, which is employed in other models and it is recommended only to few kHz [BL03].

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (dB \cdot km^{-1}) \quad (C.5)$$

In this equation,  $A_i$  and  $P_i$  are functions that can depend on the sound speed profile, temperature, salinity, depth and pH. Their value can be consulted at [FG82b]. Parameters  $f_1$ ,  $f_2$  are the relaxation frequencies of boric acid and magnesium sulfate, respectively, and  $f$  is the wave frequency, all of them given in kHz.

Given the dependence on the sound speed profile, the absorption coefficient is computed in all the water column, and the correct value is taken to compute the absorption loss depending on the depth of the ray in that moment, that is, in which layer the ray is. Thus, absorption loss is computed in each step from one layer to another for each ray, and it is accumulated.

The bottom loss,  $TL_{bot}$ , can be computed in the model by two different ways. One of them, by considering a constant bottom loss per rebound, defined by the user. The other

one, by using the Rayleigh model [Uri83], given by (C.6), which is one of the easiest ways to compute the bottom loss in practice, because of considering different parameters that are easy to estimate:

$$TL_{bot} = 10 \log \left[ \frac{q \sin \theta_b - (n_c^2 - \cos^2 \theta_b)^{1/2}}{q \sin \theta_b + (n_c^2 - \cos^2 \theta_b)^{1/2}} \right]^2 \quad (dB) \quad (C.6)$$

Where  $q = \rho_b/\rho_w$  and  $n = c/c_b$ .  $\rho_b$  is the bottom density and  $\rho_w$  is the water density, both of them in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $c$  is the sound speed in water and  $c_b$  is the sound speed in bottom material, both of them in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Lastly,  $\theta_b$  is the grazing angle at the bottom.

The last contribution to energy loss are the rebounds at the sea surface,  $TL_{sur}$ . One of the simplest equations to calculate the energy loss at the surface is the Beckmann-Spizzichino equation, which in addition is one of the most accurate models to calculate this energy loss [JDM<sup>+</sup>10]. In this work, this equation has been implemented in the form given by Coates [Coa88], which is shown in (C.7):

$$TL_{sur} = 10 \log \left( \frac{1 + (f/b_1)^2}{1 + (f/b_2)^2} \right) - \left( 1 + \frac{90 - v_w}{60} \right) \left( \frac{\theta}{30} \right)^2 \quad (dB) \quad (C.7)$$

Where  $f$  is the signal frequency in kHz,  $v_w$  is the wind speed in knots,  $\theta$  is the angle of incidence at the surface in degrees,  $b_1 = \sqrt{10}b_2$  and  $b_2 = 378v_w^{-2}$ . The total transmission loss for each ray can be then obtained by adding all the previous terms:

$$TL = TL_{geo} + TL_{abs} + TL_{bot} + TL_{sur} \quad (C.8)$$

#### C.2.4. Fading and Doppler spread caused by wind-generated waves

Although the sea surface is assumed to be flat for computing the ray paths, the effect of wind-generated waves is considered in the model. The movement of the sea surface will cause a displacement of the reflection point of the surface-reflected waves. This fluctuating movement provides a spreading of the signal frequency, which is called Doppler spread,  $B_D$ , and it is given by (C.9) [BL03, Sto03]:

$$B_D = 0.0175 \left( \frac{f}{c} \right) v_w^{3/2} \cos \theta \quad (Hz) \quad (C.9)$$

In this equation,  $f$  is the signal frequency in Hz,  $c$  the sound speed in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_w$  the wind speed in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $\theta$  the angle of incidence to the surface. This Doppler spread causes a widening of the signal spectrum, which worsens the properties of the coded signals.

Additionally, the surface-reflected signal will be affected by fading due to the movement of the sea surface. This signal will suffer from changes in amplitude and signal phase fluctuations, which is an extremely important effect to consider in BPSK modulated signals, and it is not usually included in current propagation models. According to experimental

tests, the surface-reflected signals seem to suffer from a Rayleigh fading in amplitude and also phase shifts [ULB69, Uri83].

Considering both Doppler spread and fading, the propagation model computes a dynamic transfer function. This function applies a Rayleigh fading in amplitude to these surface-reflected signals, as well as a random phase shift following a uniform distribution, whereas the signal spectrum is spread by means of (C.9). If there is no wind speed, the sea-surface can be considered like a perfect reflector, and then the model only considers a phase shift of  $180^\circ$  in the reflected signal, in addition to energy loss.

### C.2.5. Experimental validation of the propagation model

The propagation model has been validated using data obtained in pool tests, as well as a comparison with other data obtained from the literature. In this section, the most representative results from the validation using a pool test are presented.

The pool is placed outdoors in a sports facilities in Alcalá de Henares, Spain. One emitter and one receiver were placed at opposite ends of the pools, as described in Figure C.4. A spread-spectrum signal is emitted, that consists in a BPSK modulated Kasami code. When the coded signal is sent, it will arrive at the receiver after following different paths with different times-of-flight (TOF). This signal will be recorded. A matched filter will then be employed offline to detect the emitted code as the correlation peaks of the resulting signal. That way, the TOF can be obtained as the difference between the arrival time and the signal duration. The objective of this test is to identify these arrivals and compare the results for the TOF of the real and simulated signals. Synchronization is needed between emitter and receiver to obtain these TOF. In this test, it was obtained using a radiofrequency link.

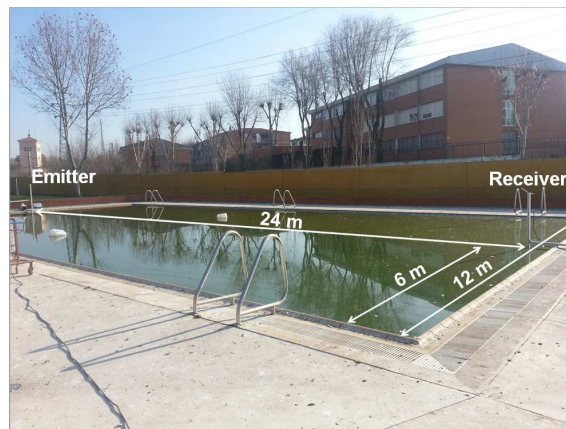


Figure C.4: Pool dimensions and set up for the test

The emitted signal consist of a 63 bits Kasami code [Kas68], BPSK modulated using 2 cycles per symbol for a total duration of approximately 0.6 ms. The emitter is a high-frequency ProWave 200LM450 transducer with a bandwidth of 25 kHz and a beamwidth

of  $20^\circ$  (horizontal and vertical), considering a signal loss of 6 dB. In this test, the carrier frequency is 200 kHz. At the receiver, an omnidirectional Reson TC4034 hydrophone was used to acquire and store the signal in a computer at a sampling frequency of 1 MHz.

In order to obtain the simulated signal, the rays were launched between  $-30^\circ$  and  $30^\circ$  to replicate the characteristic emission of the ProWave 200LM450. The only information about the beam pattern of this emitter is a signal loss of 6 dB for an angle greater than  $\pm 10^\circ$ . A value of  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  for the wind speed, 12 dB of SNR and a water temperature of  $8^\circ\text{C}$  were used in the simulation. The water temperature was measured on site and considered constant for all the water column. The dimensions have been defined in Figure C.4, and the information of frequency response provided by the transducer manufacturer is also included.

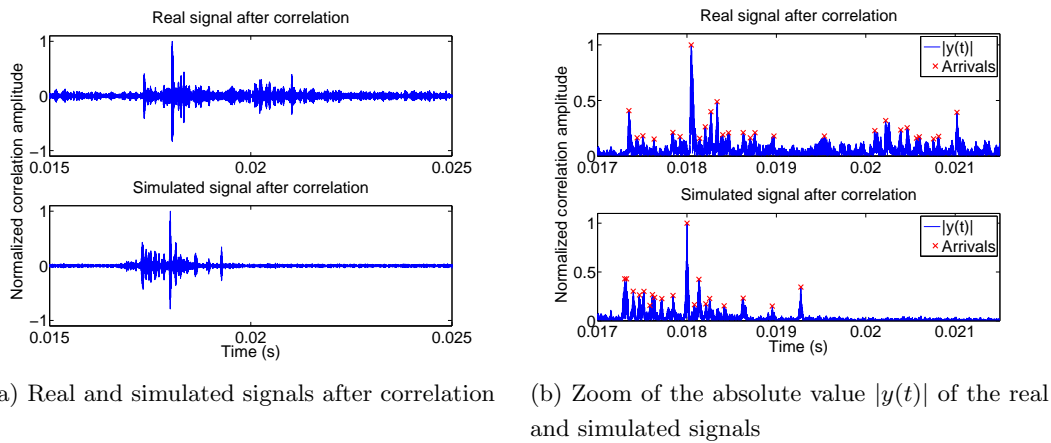


Figure C.5: Comparison of the model output with real data

The real (top) and simulated (bottom) signals after correlation are shown in Figure C.5 (a). Taking into account that a phase shift can provide a negative peak, the absolute value of the correlation signals,  $|y(t)|$ , is shown in Figure C.5 (b) for a time window close to the first arrival. The arrivals whose amplitudes are bigger than the correlation noise have been remarked.

The results show a similar behavior for the TOF in both real and synthetic signals, and even for the normalized amplitudes. The synthetic results are closely related to the real ones even for complicated scenarios with a strong multipath component. These results indicate that the model describes fairly well the acoustic propagation that is taking place, so it could be used to study the propagation conditions and system performance even in such unfavorable environments. More results about the model development and validation can be found in [1], [2], [4] and [7]. Additional tests were carried out to compare the results of the proposed model with another ray-tracing model (BELLHOP, [PB87]), showing a good agreement.



### C.3. Study of different coding schemes in underwater environments

In this chapter, an statistical study of the performance of coded signals in the underwater medium is presented. CDMA techniques has proven to be a very important tool to improve the results of systems based on distance estimation, such as sonar or positioning systems, as it provides a more precise estimation of the distance between different nodes.

Nevertheless, the influence of the underwater environment on the signal detection, considering the variation of several parameters like wind speed, noise or the distance between nodes, is yet to be studied. CDMA techniques provide gain process and some immunity against noise and multipath, so it is very important to know how channel variations will affect the detection of these coded signals, considering that later on, a positioning algorithm will have to compute the estimated position using a corrupted measure.

Based on the previous experience of the group with coded signals [DHJ<sup>+</sup>10, MUH<sup>+</sup>12], Complementary Set of Sequences (CSS) [TL72] and Kasami codes [Kas68] have been chosen within several available coding schemes. The reason resides in the good properties of these coding schemes with regards to the auto-correlation and cross-correlation functions, as well as providing a reasonable number of orthogonal codes.

This chapter is organized as follows. First, a comparison between Complementary Set of Sequences (CSS) and Kasami codes is performed by means of a statistical study for a shallow-water channel, considering some variations in the environmental conditions. Next, the performance of Kasami codes is evaluated in different underwater channels under several environmental conditions, in order to get the error magnitude of distance estimations. In both cases, the study have been performed using the underwater acoustic propagation model developed in this thesis, which was described in the previous chapter.

#### C.3.1. Comparison between CSS and Kasami codes

A generic environment has been considered for this study. Four surface buoys are placed at fixed positions, so the same distribution is used to evaluate the performance of the two coding schemes. The first buoy is fixed at (0,0) m, whereas the second buoy is placed at (0,600) m. The third buoy is located at (250,250) m and the fourth one at (450,350) m. Considering the situation, the detection of the codes at different distances can be studied, as well as the performance of the two coding schemes against Multiple Access Interference (MAI) and the near-far effect.

The other two variables that are going to change in the environment are the SNR and wind speed. The SNR is defined as  $E_b/N_0$ , where  $E_b$  is the energy per bit and the  $N_0$  is the noise power spectral density, assuming an additive white Gaussian noise. Despite wind speed being another source of noise, it has not been considered as an additional source in

this work, since its influence is only strong at a few kHz and the carrier frequency is 30 kHz. The values of SNR that have been used were 9, 0 and -9 dB, obtaining three different situations with a good SNR in the first case, a noticeable noise in the second one and a clearly unfavorable case in the third one. Four different values have been used for the wind speed: 0.3, 2, 4 and 6 m·s<sup>-1</sup>, representing different situations from no wind to a remarkable wind.

Due to the statistical nature of Gaussian noise and the computed dynamic transfer function obtained with the propagation model, one hundred simulations have been conducted for each value of wind speed and SNR considered. The average error in the position of the buoys have been obtained as the distance between the real and estimated positions, using the MDS positioning algorithm [Tor52].

The results are shown in Figure C.6, where a different scale in the Y axis has been used. This figure shows the average error in the estimated position for the different buoys, for different conditions of SNR (in the X axis), and wind speed. These results show that Kasami codes provide a better behavior than CSS codes, with errors of one or two orders of magnitude smaller than CSS. The high errors obtained with CSS are due to the detection of a cross-correlation peak as the auto-correlation peak mainly because of the near-far effect, thus the estimated position of the buoy can be biased as far as 180 m. Kasami codes seem to be more robust against the same effect.

Considering these results, the main source of errors is the multipath effect. Multipath is greater with small values of wind speed, as the transmission loss at the sea surface depends directly on this parameter, meaning that a plain surface provide rebounds with almost no energy loss. As the wind speed becomes greater more multipaths signals are highly attenuated, so there is less interference at the receiver and the codes are more clearly distinguished. Even in situations with a high wind speed and thus, a weak multipath component, Kasami signals provide a better estimation of the distance between the different nodes than CSS codes, as can be seen in Figure C.6. More information about this study can be found at [5].

### **C.3.2. Performance of Kasami codes in different underwater environments and channel conditions**

Considering the results obtained in the previous section, it can be concluded that Kasami codes are more effective against near-far effect and cross-correlation, providing a better estimation of the position of the nodes. Nevertheless, other effects such as the influence of different sound speed profiles need to be explored. In addition, the influence of the channel in the distance estimation using coded signals need to be assessed.

That way, an additional statistical study on Kasami codes was performed to obtain the influence of channel conditions in distance estimation between two nodes. This study has

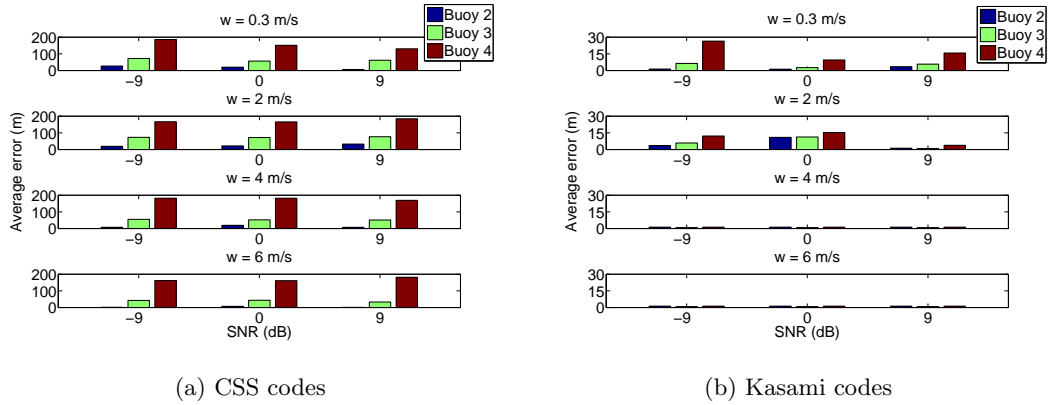


Figure C.6: Average errors for different values of SNR and wind speed ( $w$ ) using: (a) CSS codes and (b) Kasami codes. Note the different scales used in both Y axes

been performed using a cluster of computers running Matlab. The two nodes are separated at distances ranging from 50 m to 300 m, in steps of 50 m. No bathymetry has been considered in this study. SNR considered values are 12, 6, 0, -6 and -12 dB, in order to use typical values for the medium, and one value of 90 dB that could be considered as if no noise were present. Wind speed ranges from 1 to 5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , in steps of 1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , considering situations with almost no wind speed, to a noticeable wind. Again, due to the statistical nature of the dynamic transfer function of the model and Gaussian noise, 900 simulations for each combination of distance between two nodes, SNR and wind speed have been launched.

A 255-bit BPSK modulated Kasami signal is sent from one surface buoy to the other. The receiver applies a matched filter to the received signal to obtain the correlation peaks and detect the signal arrival, that allows to know the time-of-flight,  $t_{TOF}$ . Knowing the duration of the code,  $t_{code}$ , and one value of sound speed, the distance between the two buoys,  $d$ , can be computed by means of (C.10). In this study, the sound speed value at the transducer depths,  $z_e$ , has been employed. This transducer depth is 2 m.

$$d = (t_{TOF} - t_{code}) \cdot c(z_e) \quad (\text{C.10})$$

The influence of the SNR, multipath and wind speed will affect the estimation of the time-of-flight,  $t_{TOF}$ . Considering different sound speed profiles, the influence of assuming a constant value for the sound speed in (C.10) can also be assessed in this study.

### A. Distance estimation in shallow-waters environments

For the shallow-waters scenario, a constant bottom depth of 20 m is considered, as well as a constant temperature of 12°C for the water column. This temperature provides a sound speed value of 1455  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Figure C.7 shows the mean errors in range estimation for all the considered values of wind speed, distance and SNR. Errors at short distances, such as 50 m and 100 m are

usually low for all cases, around few centimeters. At 100 m, the largest error (of about 60 cm) is obtained for the highest noise value (-12 dB) and the lowest wind speed value, that is, when the noise is considerable and there is a strong multipath component, as the surface paths have not lost much energy.

In general, the largest errors are obtained for a distance of 150 m, with a value of 1.6 m in the worst case. Given the strong multipath component that is present in shallow-waters, it seems that for that distance the interference pattern is particularly harmful. When the wind speed values get higher and the multipath coming from surface paths is destroyed, the error tend to get lower again, down to few centimeters. Multipath seems again the main source of errors, supporting the results obtained in the preceding section.

Additionally, it can be concluded that SNR is not affecting that much the distance estimation for the values considered, as only the simulation with -12 dB provides some noticeable error for some of the distances, showing the goodness of using CDMA techniques in noisy environments.

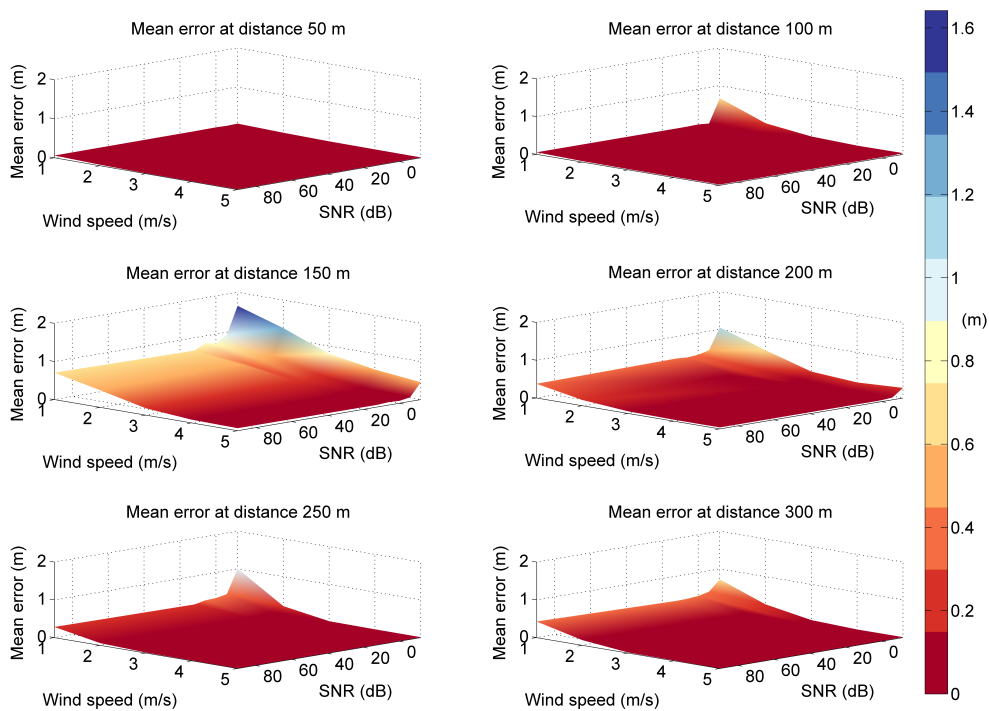


Figure C.7: Mean errors for a shallow-water scenario

## B. Distance estimation in a surface duct channel

In this study, the sound speed profile allows the formation of a surface duct, as can be seen in Figure C.8. The transducer depths are the same as in the previous case, as well as the properties of the environment with the exception of bottom depth, which is of 100 m in

this case, representing then a situation with less multipath, since the energy of the different arrivals is more distributed over the water column.

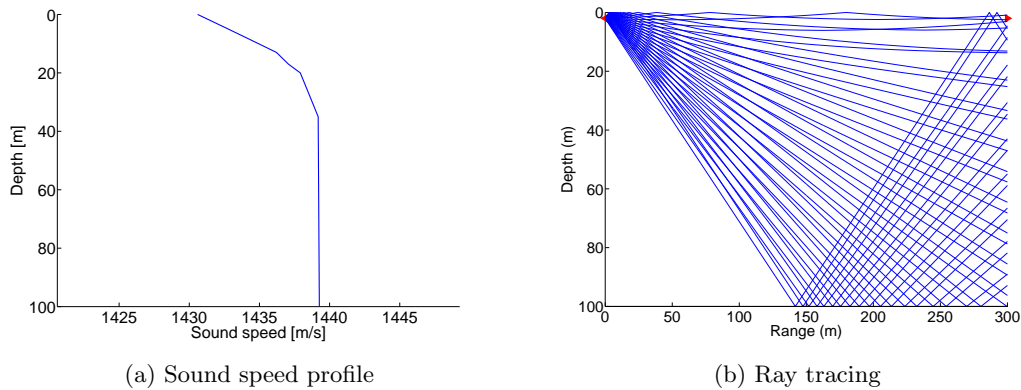


Figure C.8: Sound speed profile (a) and ray tracing (b) considered for the surface duct propagation

Figure C.9 shows the mean errors in range estimation for all the values of wind speed, distances and SNR for this scenario. As can be seen, errors are lower than in the shallow-water channel presented in the preceding subsection. This is due to the fact that there is less multipath at the receiver, as depth is higher. The usual errors are about 2-3 cm for distances between 50 and 200 m, and around 10 cm for distances of 250 and 300 m.

Range estimation is worse as the distance between transducers increases, because of the uncertainty of the sound speed profile at the receiver. Nevertheless, for the distances considered in these simulations, is not an important effect, but it could cause high errors for distances between transducers of few kilometers.

Again, SNR does not seem to be important for the values considered, causing slight changes in the mean error. In this case wind speed does not seem either to be affecting noticeably distance estimation, with the exception of the errors for the distance of 250 m, where some stronger interference must be taking place. However, even for that distance the mean error ranges from approximately 6 to 10 cm.

More information and results for the errors in distance estimation using Kasami codes can be found in [6].

#### C.4. Proposal of an underwater positioning system based on data fusion

Underwater positioning systems are experiencing a growing interest in the last decades, due to the importance of knowing the location of one or several nodes that are working on a particular environment, such as underwater sensor networks or in navigation applications for Remotely Operated Vehicles (ROV) or Autonomous Underwater Vehicles (AUV).

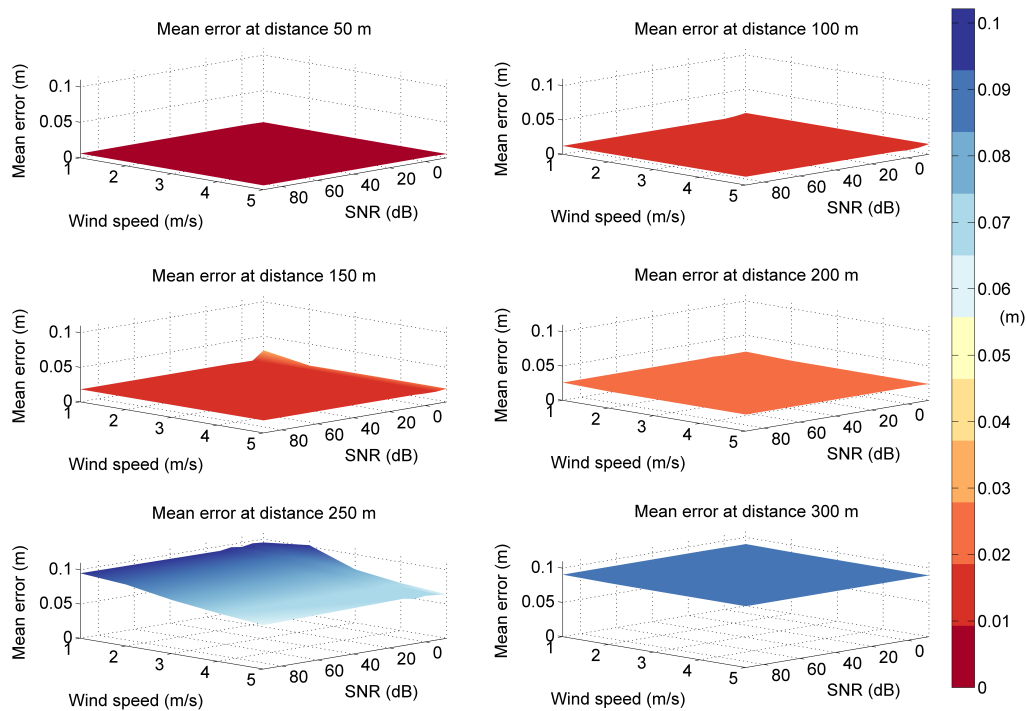


Figure C.9: Mean errors for a surface duct scenario

As GPS signals cannot propagate underwater, acoustics is a very versatile solution in underwater media. Nevertheless, the use of data fusion allows to take advantage of the best properties of different technologies, obtaining then a more robust system. In the last year, several positioning systems based on data fusion have been proposed, as it was mentioned in chapter C.1.1.

In this thesis, an underwater positioning system based on GPS signals and underwater acoustics is proposed. This system uses GPS signals to obtain the position of several surface nodes, and obtains the position of a submerged node (AUV, ROV, etc.) in one of the surface nodes, which it is called master node. All the surface nodes are equipped con GPS receivers, acoustic transducers and a radiofrequency emitter and receiver to send and received data. The acoustic transducer in the master node must act as an emitter and receiver, whereas a acoustic receiver is used in the other surface nodes. The submerged node only needs an acoustic transducer acting both as an emitter and receiver, and a pressure sensor.

In order to obtain a more precise estimation of the times-of-flight between the buoys and the submerged node, the acoustic signals are coded using Kasami sequences, taking into account the results shown in chapter C.3. The use of CDMA provides a process gain against noise and some tolerance to MAI (Multiple Access Interference) and multipath, which will be useful in certain environments such as shallow waters.

This chapter is divided as follows. First, a description of the positioning system is

presented. Later on, some results of the system performance for different positioning algorithms are shown. These results are based on the statistical study conducted in chapter C.3 for different channels and environmental conditions.

#### C.4.1. Measurement process

In order to obtain the position of the submerged node, the distances between this node and the surface nodes need to be calculated. The positions of the surface nodes are assumed to be known by means of the GPS receivers.

The master node starts the measurement process by emitting a Kasami code that has been assigned to it. This emission takes place in a specific time instant, which is known by the others surface nodes by means of Pulse-per-Second (PPS), included in GPS technology. That way, all the surface nodes are synchronized with the same clock.

After some time, the Kasami signal emitted by the master node arrives at the submerged node. This node is continuously analyzing the acoustic signal captured with the acoustic transducer, and uses a filter matched to the Kasami code of the master node to detect this signal. When this detection is performed, the submerged node emits its own signal, which consist of a different Kasami code. The signal from the submerged node will reach the surface nodes eventually, and they will detect it in a similar way. The rest of the surface nodes later send the information they have collected to the master node using the radiofrequency link. This information consist of their position and the time-of-flight of the submerged node signal.

This measurement process is shown in Figure C.10, where three surface nodes have been considered, along with one submerged node. The emitted and received signals are represented with continuous and dashed lines, respectively. The arrival times since the emission of the code from the master node,  $Code_1$ , and the reception of the code from the submerged node,  $Code_S$ , have been denoted as  $t_{iS}$ , where  $i = 1, 2, 3$ . Additionally, the processing time  $t_p$ , between the detection of  $Code_1$  at the submerged node and the emission its own code  $Code_S$ , has also been marked. This time  $t_p$  is assumed to be known by a characterization process of the submerged node hardware.

Knowing these times  $t_{iS}$ , the distances between the surface nodes and the submerged node can be calculated. For the master node ( $i = 1$ ), this distance is

$$d_{1S} = \frac{t_{1S} - t_p}{2} \cdot c \quad (C.11)$$

Where  $c$  is the sound speed, that can be measured by the master node at one particular depth. For the rest of the surface nodes, the distances are obtained by (C.12)

$$d_{iS} = (t_{iS} - t_p) \cdot c - d_{1S} \quad (C.12)$$

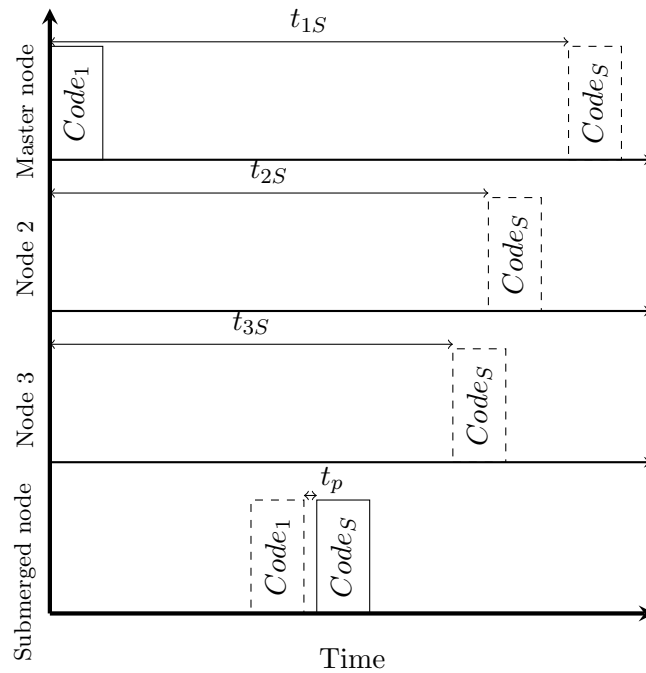


Figure C.10: Measurement process of the underwater positioning system

where  $i = 2, 3$ . Knowing all the distances, between the nodes and the positions of the surface nodes, the positioning algorithm can compute the location of the submerged node.

One advantage of this measurement process scheme is that only two emissions to the medium are needed: one from the master node, and another one from the submerged node. Additionally, all the surface nodes are synchronized, and the submerged node does not need any synchronization due to the round-trip scheme considered. For distances between nodes smaller than one kilometer, this measurement process will not induce considerable delays in the refresh frequency of the position of the submerged node.

If another submerged node is to be added to the environment, the only requirement is the use of a different Kasami code. That way, both submerged nodes will reply to the signal emitted by the master node, and the surface nodes will detect their codes, even when they arrive at the same time, by means of the properties of CDMA. Adding more submerged nodes do not have any consequences on the total time for obtaining their position, since they can be computed simultaneously. Only one more emission to the medium per added node is needed.

#### C.4.2. Brief description of the positioning algorithms studied

When the distances between all the nodes are obtained, and given the position of the surface nodes by means of the GPS, positioning algorithms can be employed to calculate the location of the submerged node.



In this thesis, five algorithms have been studied and adapted to the peculiarities of the proposed positioning system, in order to test their performance under different conditions. These positioning algorithms are:

- **Spherical trilateration:** this is the basic algorithm to obtain the position of some node knowing the distances between some nodes acting as beacons (the surface nodes in this case), and the node to locate. This method considers the equations that result from the intersection of at least three spheres with center in three surface nodes and radius equal to the measured distance from that particular beacon to the node to be located. There are several approaches to perform a spherical trilateration. In this work, a linealization process have been considered combining the equations for two surface nodes, as explained in [Roa05].
- **Gauss-Newton:** this method is also based on the spherical trilateration, but considers an iterative approach. The Gauss-Newton method is one of the most known of this kind, and also one of the most used, due to the usually good results it provides [Roa05]. This method starts with an initial position, and minimizes a cost function until a tolerance criteria is met.
- **Cayley-Menger determinants:** the positioning algorithm based on the Cayley-Menger determinants [Som58] is one of the most novel methods employed in the Electronics Department of the University of Alcalá in airborne environments. This algorithm obtains the position of the node using the geometrical properties of the Cayley-Menger determinants, with a low computing time and the same precision than other algorithms such as Gauss-Newton [RUG<sup>+</sup>13].
- **Multi-Dimensional Scaling Technique, MDS:** although the MDS technique is usually employed in relative positioning algorithms [MUH<sup>+</sup>09], it is interesting to know the performance of this technique even for the proposed positioning system, due to the fact that theoretically it minimizes the error due to noisy measures, and its use is not restricted to relative positioning algorithms. The metric method presented by Torgerson [Tor52] has been considered in this work, and calculates the relative position of all the nodes in the positioning system with respect to one of them (the master node in this case), which acts as the origin of the coordinate system.
- **Optimization by Levenberg-Marquardt:** it is usually considered that the MDS technique provides a good first approach to the real position of the node, but it can be not good enough. The Levenberg-Marquardt algorithm allows to find a local minimum using a particular starting point, so the MDS solution can be used as this starting point to improve the results using this method [MUM<sup>+</sup>06]. That way, in addition to testing how good the MDS results are, the goodness of this optimization process can be assessed and compared with other iterative algorithm like the Gauss-Newton.

### C.4.3. Performance of the proposed positioning system

In this section the most representative results for the performance of the positioning system under different conditions are presented. An environment of  $800 \times 800$  square meters has been considered, where several surface nodes have been deployed. A submerged node is traveling underwater. To test the performance of the positioning system in all the environment, it is assumed that the submerged node is placed at different locations in both axis, regularly spreaded, for a total of between 441 and 841 test points, depending on the distance considered between the surface nodes (300 meters in the first case, 50 meters in the second case).

In each test point the real distances between nodes are contaminated with Gaussian noise with a medium and standard deviation that represent the results obtained in the statistical study for the Kasami signals presented in chapter C.3. That way, 100 simulations have been run in each test point to take into account the statistical behavior of the channel.

The study of the positioning system is conducted using the five positioning algorithms, for each combination of number of surface nodes, distance between them  $d$ , depth of the submerged node  $z_e$ , Gaussian noise in the acoustic measures with medium  $\mu_{acu}$  and standard deviation  $\sigma_{acu}$ , and Gaussian noise in the GPS measure with zero medium and standard deviation  $\sigma_{GPS}$ . The values for these variables that have been used in the statistical study have been summarized in Table C.2.

Variable	Values
Number of surface nodes	3, 4, 5
$d$ (m)	50, 300
$z_e$ (m)	2, 4, 30, 60
Gaussian noise in the acoustic measures (m)	$\mu_{acu} = 0.05, 1, \sigma_{acu} = 0.03, 0.5$
Gaussian noise in the GPS measure (m)	$\sigma_{GPS} = 0, 0.3, 3$

**Table C.2:** Values considered in the statistical study of the positioning system performance

This way, the influence of each one of these variables in the estimated position can be assessed. The performance criteria is the mean absolute error  $\Delta$  for the 100 simulations in each point, computing this error, for each positioning algorithm, as

$$\Delta = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \quad (\text{C.13})$$

where  $(x, y)$  is the real position, and  $(x', y')$  is the estimated position. Depth is calculated by means of a pressure sensor.

Figure C.11 shows the influence of the number of surface nodes by means of the cumulative distribution function (CDF) for the error  $\Delta$ . A value of  $d = 50$  m,  $z_e = 4$  m,

and  $\sigma_{GPS} = 0$  m have been considered, as well as a favorable situation of Gaussian noise in the acoustic measures, with  $\mu_{acu} = 0.05$  m and  $\sigma_{acu} = 0.03$  m, and an unfavorable situation with  $\mu_{acu} = 1$  m and  $\sigma_{acu} = 0.5$  m.

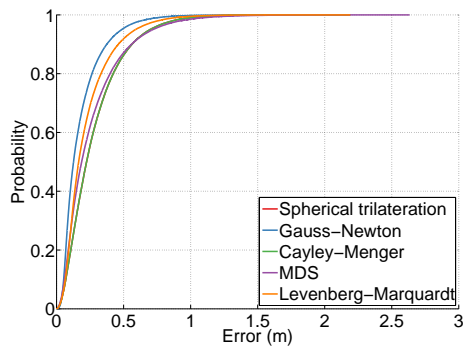
Considering the obtained results, all the algorithms provide a better estimation when more surface nodes are available, since there are more measures and therefore, more information in the system. However, as it can be seen in the figure, Gauss-Newton, Cayley-Menger and the spherical trilateration (which obtains the same position than Cayley-Menger using three and five buoys) improve their results considerably better than the other algorithms, so these algorithms seem to be a better choice when a more than three surface nodes are available. Note the different scales used in (a), (c), (e) and (b), (d), (f) in the X axis.

The distance between the surface nodes has also an impact on the positioning system performance. This behavior is shown in Figure C.12, where the same unfavorable situation in the acoustic estimation using three surface nodes of the previous result has been considered. In this figure, the results for a distance of 50 m (a) is compared with the ones obtained for a distance of 300 m (b). The results for a favorable situation for 50 m and 300 m are shown in (c) and (d), respectively. These results show that spreading the buoys will provide better results in the estimation of the submerged node, since the coverage area of the system is higher. Once again, note the different scales used in (a), (b), and (c), (d), in the X axis.

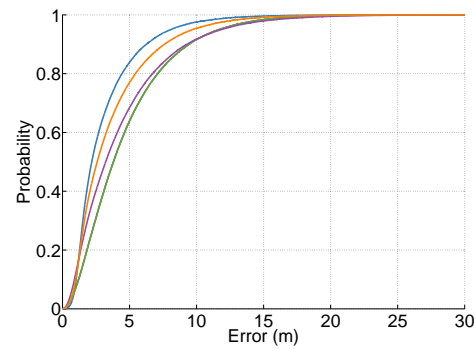
Finally, the influence of the GPS error in the estimation of one of the surface nodes is shown, since it is important to assess how this uncertainty will affect the estimation of the submerged node. These results are shown in figure C.13, where five surface nodes and values of  $d = 300$  m,  $z_e = 4$  m,  $\mu_{acu} = 0.05$  m and  $\sigma_{acu} = 0.03$  m have been considered, for (a)  $\sigma_{GPS} = 0$  m, and (b)  $\sigma_{GPS} = 3$  m. This value of  $\sigma_{GPS}$  represents a typical one, attending at the data sheet provided by some commercial systems. Note the different scales in the X axis.

These results show that the error in the estimation of the GPS, which imply an incorrect beacon position, is one of the main source of errors, along with a bad acoustic measure.

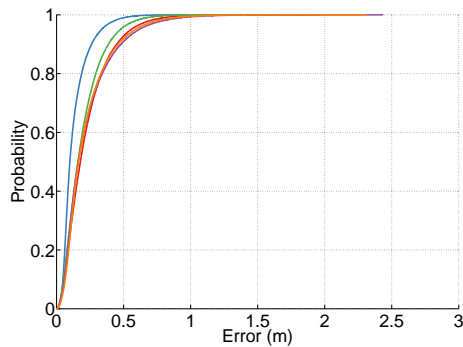
Using Gauss-Newton or the Cayley-Menger algorithms, the errors in the estimated position of the submerged node are below 5 m in 95% of the tested positions for most situations, which it is a reasonable value considering that the system only relies on acoustic measures, along with the GPS to estimate the position of the surface nodes. For low errors in the acoustic estimation and the GPS positioning of the surface buoys, along with a reasonable number of surface nodes spreaded in the environment, errors of the order of tens of centimeters can be found in 95% of the tested positions. The algorithms used in this thesis can be applied in different positioning systems, like those presented in [3] or [4].



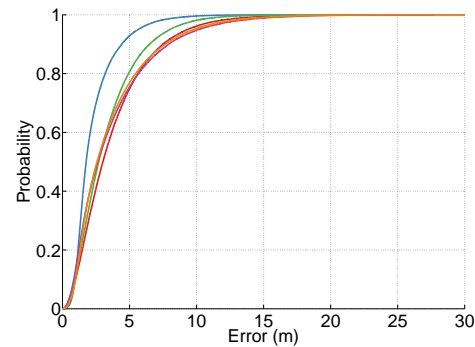
(a) Favorable situation with 3 surface nodes



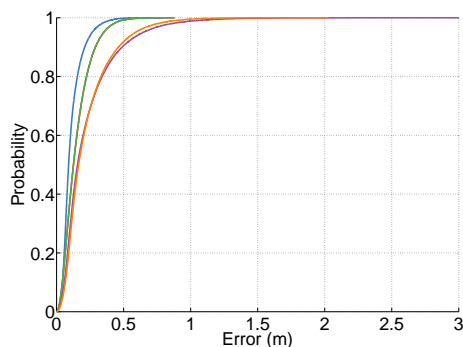
(b) Unfavorable situation with 3 surface nodes



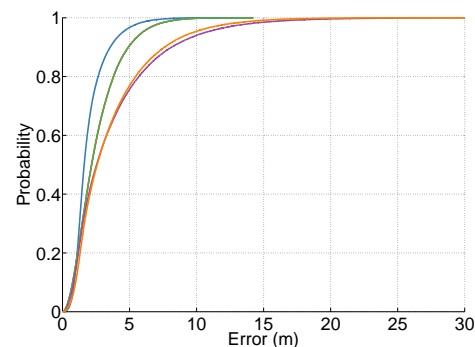
(c) Favorable situation with 4 surface nodes



(d) Unfavorable situation with 4 surface nodes



(e) Favorable situation with 5 surface nodes



(f) Unfavorable situation with 5 surface nodes

Figure C.11: Influence of the number of surface nodes

## C.5. Conclusions and future work

### C.5.1. Conclusions

In this thesis, an enhanced underwater positioning system based on GPS and acoustic signals coded by CDMA technique has been proposed. Its behavior for different environmental conditions and scenarios has been analyzed using a new underwater acoustic propagation model based on ray-tracing. The main contributions of this thesis can be summarized as follows:

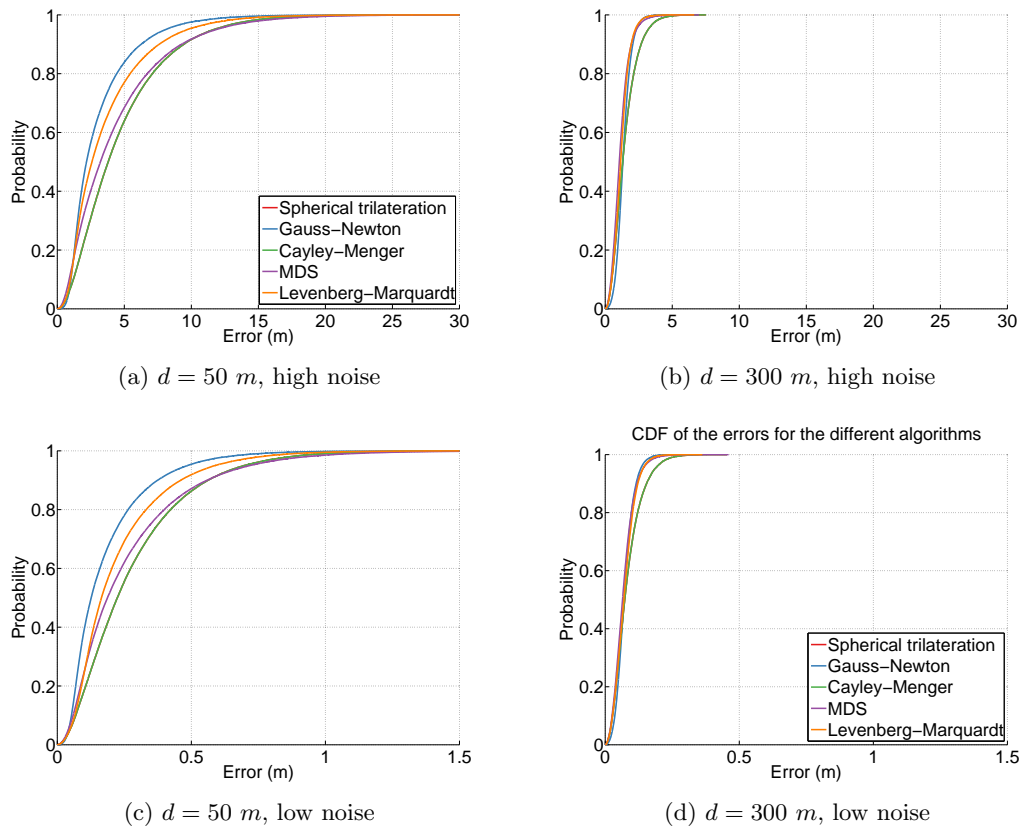


Figure C.12: Influence of the distance between three surface nodes

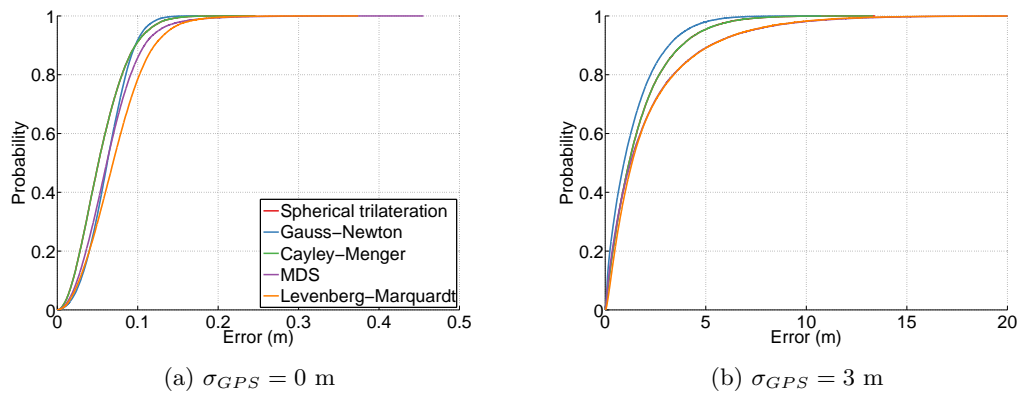


Figure C.13: Influence of the GPS error

- *New underwater acoustic propagation model.*

A propagation model based on ray-tracing for underwater acoustic signals has been developed. This model considers the usual phenomena, that is, geometrical spreading, absorption loss and rebound losses at the sea surface and the bottom, and also includes the Doppler spread and dynamic effect of wind-generated waves, which it is not usually considered.

Due to the set of equations employed to describe the physical phenomena, the model has a wide range of valid inputs for the sea condition, allowing its use for both fresh and sea water and from shallow waters to deep waters. Additionally, the model considers a bathymetry profile and thus, some range dependency is also considered. That way, the developed propagation model can be used in almost all kind of scenarios and acoustic signals.

Since the model replicates the acoustic propagation between two points, it can be used to study the behavior of any system based on acoustic transmissions. It is not limited to the study of the positioning system proposed on this thesis. That way, the model has a high applicability for any kind of underwater acoustic systems.

In addition, the results obtained with the model have been validated by means of experimental tests, showing a good agreement even in complex scenarios with a strong multipath and reverberation component.

- *Study of the performance of coded signals in underwater environments.*

Two different coding schemes have been considered in this thesis: Complementary Set of Sequences (CSS) and Kasami, due to their good correlation properties and the availability of a set of orthogonal codes with a sufficient number of them.

Considering CSS and Kasami signals, a statistical study has been presented to test their behavior in underwater environments under different conditions of SNR, wind speed (which causes Doppler spread), distance and cross-correlation detection. This study have been conducted with the underwater acoustic propagation model in a shallow water environment, and showed that Kasami signals are more robust than CSS. The results with Kasami signals show less errors in the detection and more tolerance to the near-far effect caused by the superposition of multiple codes at different distances.

An additional statistical study has been then conducted using Kasami codes to test their detection in more situations than the previous study, considering more values for SNR, wind speed, distance and different environments with particular sound speed profiles. This study allowed to characterize the errors and standard deviation in the detection of coded signals for all these cases. This information is crucial in systems based on times-of-flight estimation, as the one proposed in this work.

- *Proposal of an underwater positioning system.*

An underwater positioning system based on data fusion of GPS signals for locating the surface nodes and coded acoustic signals used to obtain the position of a submerged node has been proposed. This system needs at least three surface nodes, that are equipped with GPS receivers and a radiofrequency link to send and receive data. The location of the submerged node is obtained in one of them, called master node.

This positioning system is easy to deploy and recover, since it only needs to place some surface nodes, such as buoys, and there is no need for a calibration procedure, which is costly both in time and economic resources. Additionally, based on the measurement procedure and the use of CDMA techniques, this positioning system can be easily extended to obtain the position of more submerged nodes simultaneously, without the need of increasing the time between measures.

A statistical study has been conducted to test the performance of this system working with different positioning algorithms, based on the results obtained in the study with Kasami codes that was presented previously. In addition, several configurations were also tested in this study, evaluating the distance between the surface nodes as well as their number, the depth of the submerged node and the error in the position of the surface nodes caused by the GPS. The results show a similar behavior for all the algorithms, but the results obtained with Cayley-Menger and Gauss-Newton improve considerably more than the others, when more surface nodes are available. This effect is due to a better use of the redundant information in the system by these algorithms. The magnitude of the errors are usually below 1 m or even around centimeters, increasing up to few meters for the worst cases. These values compares very well with those reported by other works found in the literature.

### C.5.2. Future work

This thesis deals with a proposal of an underwater positioning system and its study using an underwater acoustic propagation model. The results are promising, but a lot of work is yet to be done in this field, both in the model and the positioning system. Some of the tasks to be performed are:

- *Improvement of the underwater acoustic propagation model.*

The propagation model has already been validated and shows a good agreement with real results for complex environments, but there is room to improve its functionality. Some of the most interesting features that can be added to the model are a range-dependent sound speed profile, a more complex noise model or the addition of more effects like bubbles or turbulences.

- *Test the performance of the positioning system when locating more submerged nodes.*

So far, the positioning system has been applied to locate one submerged node that is navigating through the medium. The design of the positioning system allows the inclusion of more submerged nodes in a easy way, where only an additional Kasami code is needed. The performance of the positioning system when a network of submerged nodes are working in a specific environment is yet to be assessed.

- *Increase the functionality of the proposed positioning system.*

The positioning system has been used in this thesis to obtain the position of one submerged node in the master node, at the sea surface. Some improvements can be added to the system, so the submerged node could also know its current position. For a network of several submerged nodes, a cooperative positioning can be considered to facilitate the location of nodes that are far away from the surface nodes.

- *Development and experimental tests with the positioning system.*

Once that the feasibility of the positioning system has been assessed by means of the statistical studies conducted in this work, the development of a prototype is intended. When this prototype is ready, a set of experimental tests will allow to determine the behavior of this system working in a real environment.

### C.5.3. International publications derived from this thesis

- [1] J. Aparicio, F.J. Álvarez, J. Ureña, A. Jiménez, C. Diego and E. García. Swell Effect in Shallow Underwater Acoustic Communications. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2010)*, Bilbao (Spain), 4 pages, September 2010.
- [2] J. Aparicio, F.J. Álvarez, A. Jiménez, C. De Marziani, J. Ureña and C. Diego. Underwater Channel Modeling for a Relative Positioning System. In *Proceedings of the OCEANS 2011 Conference*, Santander (Spain), 7 pages, June 2011.
- [3] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, C. De Marziani, J. Ureña and C. Diego. Underwater Acoustic Relative Positioning System Based on Complementary Set of Sequences. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2011)*, Guimarães (Portugal), 4 pages, September 2011.
- [4] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani and C. Diego. Modeling the Behavior of an Underwater Acoustic Relative Positioning System Based on Complementary Set of Sequences. *Sensors* 11, pp. 11188-11205, 2011.
- [5] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani and C. Diego. Comparative Analysis of an Underwater Acoustic Relative Positioning System using Coded Signals. In *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA 2012)*, Edinburgh (United Kingdom), pp. 502-509, July 2012.



- [6] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani and C. Diego. Influence of Different Phenomena on the Errors in Distance Measurement Using Underwater Acoustics Coded Signals. In *Proceedings of the OCEANS 2013 Conference*, Bergen (Norway), 8 pages, June 2013.
  
- [7] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani, D. de Diego, N. Cruz and H. Campos. Accurate Detection of Spread-Spectrum Modulated Signals in Reverberant Underwater Environments. *Applied Acoustics*, Submitted to Applied Acoustics, 2014.



# Bibliografía

- [ACM10] R. Almeida, N. Cruz y A. Matos. Synchronized intelligent buoy network for underwater positioning. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference, Seattle*, septiembre, 2010.
- [AD98] S. Appleby y J. Davies. Time, frequency and angular dispersion modelling in the underwater communications channel. En *Proceedings of the 1998 OCEANS Conference, Niza*, volume 2, pages 644–649, septiembre, 1998.
- [AHPS97] P.E. An, A.J. Healey, J. Park y S.M. Smith. Asynchronous data fusion for auv navigation via heuristic fuzzy filtering techniques. En *Proceedings of the 1997 OCEANS Conference*, volume 1, pages 397–402. Halifax, Canadá, octubre, 1997.
- [Ain03] M.A. Ainslie. Conditions for the excitation of interface waves in a thin unconsolidated sediment layer. *Journal of Sound and Vibration*, 268(2):249–267, 2003.
- [AJI<sup>+</sup>12] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, J. Ureña, C. De Marziani y C. Diego. Comparative analysis of an underwater acoustic relative positioning system using coded signals. En *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA)*, pages 502–509. Edimburgo, Reino Unido, 2012.
- [ALBM95] D.K. Atwood, J.J. Leonard, J.G. Bellingham y B.A. Moran. An acoustic navigation system for multi-vehicle operations. En *Proceedings of the International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, pages 202–208, septiembre, 1995.
- [And71] E.R. Anderson. Sound speed in seawater as a function of realistic temperature-salinity-pressure domains. Naval Undersea Research and Development Center, NUC-TP-243, 1971.
- [AOP07] A. Alcocer, P. Oliveira y A. Pascoal. Study and implementation of an ekf gib-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*, 15(6):689–701, 2007.

- [Apa09] J. Aparicio. Estudio de modelos de canal para comunicaciones subacuáticas. Master's thesis, Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá, 2009.
- [APH98] M.A. Ainslie, M.N. Packman y C.H. Harrison. Fast and explicit wenzel-kramers-brillouin mode sum for the bottom-interacting field, including leaky modes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4):1804–1812, 1998.
- [APM05] I.F. Akyildiz, D. Pompili y T. Melodia. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3:257–279, 2005.
- [Aud04] M. Audric. GAPS, a new concept for usbl. En *Proceedings of the 2004 OCEANS Conference*, volume 2, pages 786–788, 2004.
- [Aus94] T.C. Austin. The application of spread spectrum signaling techniques to underwater acoustic navigation. En *Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pages 443–449, Cambridge (EEUU), julio, 1994.
- [BBM07] B. Bingham, B. Blair y D. Mindell. On the design of direct sequence spread-spectrum signaling for range estimation. En *Proceedings of the 2007 OCEANS Conference*, octubre, 2007.
- [BHMS91] B.M. Bell, B.M. Howe, J.A. Mercer y R.C. Spindel. Nonlinear Kalman filtering of long-baseline, short-baseline, GPS, and depth measurements. En *Conference Record of the Twenty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, volume 1, pages 131–136. Pacific Grove, Estados Unidos, septiembre, 1991.
- [BL03] L.M. Brekhovskikh y Y.P. Lysanov. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer-Verlag, 3a ed., Nueva York, 2003.
- [BLV<sup>+</sup>95] J.G. Bellingham, J.J. Leonard, J. Vaganay, C.A. Goudey, D.K. Atwood, T.R. Consi, J.W. Bales, H. Schmidt y C. Chryssostomidis. AUV operations in the arctic. En *Proceedings of the Sea Ice Mechanics and Arctic Modeling Workshop*. Anchorage, Estados Unidos, abril, 1995.
- [BM77] R.N. Baer y W.B. Moseley. Three dimensional propagation modeling using the parabolic approximation. En *Journal of the Acoustical Society of America*, volume 61, S1, pages S11–S12, 1977.
- [BNBPQ96] C. Bjerrum-Niese, L. Bjorno, M.A. Pinto y B. Quillec. A simulation tool for high data-rate acoustic communication in a shallow-water, time-varying channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(2):143–149, 1996.
- [BNL00] C. Bjerrum-Niese y R. Lützen. Stochastic simulation of acoustic communication in turbulent shallow water. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(4):523–532, 2000.

- [BR60] M.V. Brown y J. Ricard. Fluctuations in surface-reflected pulsed CW arrivals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 32(12):1551–1554, 1960.
- [BRZ11] C.A. Boyles, A.P. Rosenberg y Q. Zhang. Underwater acoustic communication channel characterization in the presence of bubbles and rough sea surfaces. En *Proceedings of the 2011 OCEANS IEEE Conference*, junio, 2011.
- [BSDF92] J.B. Bowlin, J.L. Spiesberger, T.D. Duda y L.F. Freitag. Ocean acoustical ray-tracing software RAY. Technical report WHOI-93-10, 1992.
- [Buc76] H.P. Bucker. Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 59(2):368–373, 1976.
- [Buc82] H.P. Bucker. An equivalent bottom for use with the split-step algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73(2):486–491, 1982.
- [Buc92] M.J. Buckingham. Ocean-acoustic propagation models. *Journal Acoustique*, pages 223–287, 1992.
- [Buc94] H.P. Bucker. A simple 3-D Gaussian beam sound propagation model for shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95(5):2437–2440, 1994.
- [Cal64] M.A. Calderon. Probability density analysis of ocean ambient and ship noise. U.S. Navy Electronics Laboratory, Research and Development Report 1248, 1964.
- [Can01] J.V. Candy. Model-based detection in a shallow water ocean environment. En *Proceedings of the 2001 IEEE/MTS OCEANS Conference, Seattle*, volume 2, pages 769–775, noviembre, 2001.
- [Cen09] National Oceanographic Data Center. World ocean database 2009. <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>, 2009.
- [Cen14] Centre for Marine Science and Technology. Underwater acoustic propagation modelling software - AcTUP V2.2.L. Disponible en: <https://cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox.cfm>, consultado el 8 de mayo de 2014, 2014.
- [Chi07] M. Chitre. A high-frequency warm shallow water acoustic communications channel model and measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5):2580–2586, 2007.
- [Cla76] J.F. Claerbout. *Fundamentals of Geophysical Data Processing*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, Reino Unido, 1976.

- [Cla05] C.A. Clark. Acoustic wave propagation in horizontally variable media. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1):188–197, 2005.
- [CM77] C-T. Chen y F.J. Millero. Speed of sound in seawater at high pressures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(5):1129–1135, 1977.
- [Coa88] R. Coates. An empirical formula for computing the Beckman-Spizzichino surface reflection loss coefficient. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 35(4):522–523, 1988.
- [Col88] M.D. Collins. The time-domain solution of the wide-angle parabolic equation including the effects of sediment dispersion. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(6):2114–2125, 1988.
- [Col89] M.D. Collins. Applications and time-domain solution of higher-order parabolic equations in underwater acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(3):1097–1102, 1989.
- [Col99] M.D. Collins. User’s guide for RAM versions 1.0 and 1.0p. Disponible en: <ftp://ftp.ccs.nrl.navy.mil/pub/ram/RAM/ram.ps>, consultado el 15 de octubre de 2012, 1999.
- [Com49] National Defense Research Committee. *Physics of Sound in the Sea*. National Research Council, Washington, 1949.
- [CS92] J.A. Clark y M.A. Sartori. Numerical propagation of spatially distributed acoustic sources using the exterior Helmholtz integral equation. En *Proceedings of the IEEE Sixth SP Workshop on Statistical Signal and Array Processing*, pages 338–341, octubre, 1992.
- [CS08] C.A. Clark y K.B. Smith. An efficient normal mode solution to wave propagation prediction. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(4):462–476, 2008.
- [CZZ<sup>+</sup>10] P. Carroll, S. Zhou, H. Zhou, J. Cui y P. Willett. Underwater localization based on multicarrier waveforms. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference, Seattle*, septiembre, 2010.
- [DD80] F.R. DiNapoli y R.L. Deavenport. Theoretical and numerical Green’s function field solution in a plane multilayered medium. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1):92–105, 1980.
- [dD13] D. de Diego. Diseño, desarrollo y despliegue de un sistema de posicionamiento local basado en ultrasonidos. Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2013.

- [Def94] M. Deffenbaugh. A matched field processing approach to long range acoustic navigation. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology y Woods Hole Oceanographic Institution, 1994.
- [DHJ<sup>+</sup>10] C. Diego, A. Hernández, A. Jiménez, J. Aparicio, E. García, D. Ruiz y F.J. Álvarez. Bearing estimation algorithm based on spectral analysis of the ultrasonic received echoes. En *Proceedings of the 2010 Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Bilbao, España, septiembre, 2010.
- [DJ98] B.D. Dushaw y J.A. Colosi. Ray tracing for ocean acoustic tomography. Technical Memorandum APL-UW TM 3-98, 1998.
- [dLF10] F.V.F. de Lima y C.M. Furukawa. Development of a high resolution underwater acoustic positioning system. En *Proceedings of the ABCM Symposium Series in Mechatronics*, volume 1, pages 635–642, 2010.
- [DWB06] H. Durrant-Whyte y T. Bailey. Simultaneous localization and mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2):99–108, 2006.
- [DWCH93] B.D. Dushaw, P.F. Worcester, B.D. Cornuelle y B.M. Howe. On equations for the speed of sound in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(1):255–275, 1993.
- [Ett03] P.C. Etter. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. Spon Press, 3a ed., Londres, 2003.
- [Eva83] R.B. Evans. A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74(1):188–195, 1983.
- [EVG07a] M. Erol, L.F.M. Vieira y M. Gerla. AUV-aided localization for underwater sensor networks. En *Proceedings of the International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications*, pages 44–51, agosto, 2007.
- [EVG07b] M. Erol, L.F.M. Vieira y M. Gerla. Localization with Dive’N’Rise (DNR) beacons for underwater acoustic sensor networks. En *Proceedings of the WUWNet’07*. Montreal, Canadá, septiembre, 2007.
- [EWSG07] R.M. Eustice, L.L. Whitcom, H. Singh y M. Grund. Experimental results in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation for autonomous underwater vehicles. En *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4257–4264. Roma, Italia, abril, 2007.
- [FBR<sup>+</sup>92] J.H. Fischer, K.R. Bennett, S.A. Reible, J.H. Cafarella y I. Yao. A high data rate, underwater acoustic data-communications transceiver. En *Proceedings of the OCEANS 1992 Conference*, volume 2, pages 571–576, octubre, 1992.

- [FD07] J.P. Fabre y S.M. Dennis. Characterization of the variability of the ocean acoustic environment. En *Proceedings of the OCEANS 2007 MTS Conference*, octubre, 2007.
- [FG82a] R.E. François y G.R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3):896–907, 1982.
- [FG82b] R.E. François y G.R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contributions and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6):1879–1890, 1982.
- [FGSJ00] L. Freitag, M. Grund, S. Singh y M. Johnson. Acoustic communication in very shallow water: results from the 1999 AUV Fest. En *Proceedings of the OCEANS 2000 Conference*, volume 3, pages 2155–2160, septiembre, 2000.
- [FJK82] M.C. Ferla, F.B. Jensen y W.A. Kuperman. High-frequency normal-mode calculations in deep water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(2):505–509, 1982.
- [FLLP05] F. Frassati, C. Lafon, P. Laurent y J. Passerieux. Experimental assessment of OFDM and DSSS modulations for use in littoral waters underwater acoustic communications. En *Proceedings of the OCEANS 2005 Europe Conference*, volume 2, pages 826–831, junio, 2005.
- [FMC10] B. Ferreira, A. Matos y N. Cruz. Single beacon navigation: Localization and control of the MARES AUV. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*. Seattle, Estados Unidos, septiembre, 2010.
- [FP71] H.W. Frye y J.D. Pugh. A new equation for the speed of sound in seawater. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50(1):384–386, 1971.
- [Fra59] G.J. Franz. Splashes as sources of sound in liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(8):1080–1096, 1959.
- [FS77] F.H. Fisher y V.P. Simmons. Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(3):558–564, 1977.
- [FW95] F.C. Felizardo y W.K. Melville. Correlations between ambient noise and the ocean surface wave field. *Journal of Physical Oceanography*, 25(4):513–532, 1995.
- [FWT95] J.A. Fawcett, E.K. Westwood y C.T. Tindle. A simple coupled wedge mode propagation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98(3):1673–1681, 1995.



- [GC96] R. Galvin y R.F.W. Coates. A stochastic underwater acoustic channel model. En *Proceedings of the OCEANS'96 MTS/IEEE Conference*, pages 203–210, septiembre, 1996.
- [GHMR08] K. Grythe, J.E. Håkegård, T.A. Myrvoll y T.A. Reinen. The Trondheim harbour: Acoustic propagation measurements and communication capacity. En *Proceedings of the OCEANS 2008 Conference*, septiembre, 2008.
- [Gol49] M.J. Golay. Multi-slit spectrometry. *Journal of the Optical Society of America*, 39(6):437–444, 1949.
- [Gol51] M.J. Golay. Static multi-slit spectrometry and its application to the panoramic display of infrared spectra. *Journal of the Optical Society of America*, 41(7):468–472, 1951.
- [Gol61] M.J. Golay. Complementary series. *IRE Transactions of Information Theory*, IT-7:82–87, 1961.
- [Gol67a] R. Gold. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-13:619–621, 1967.
- [Gol67b] S.W. Golomb. *Shift Register Sequences*. Holder-Day, San Francisco, EEUU, 1967.
- [GPS98] S. Grilli, T. Pedersen y P. Stepanishen. A hybrid boundary element method for shallow water acoustic propagation over an irregular bottom. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 21:131–145, 1998.
- [Gro74] V.A. Del Grosso. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4):1084–1091, 1974.
- [GS96] J.T. Goh y H. Schmidt. A hybrid coupled wave-number integration approach to range-dependent seismoacoustic modeling. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3):1409–1420, 1996.
- [GZ95] X. Geng y A. Zielinski. An eigenpath underwater acoustic communication channel model. En *Proceedings of the OCEANS 1995 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 1189–1196, octubre, 1995.
- [GZVG06] O.A. Godin, V.U. Zavorotny, A.G. Voronovich y V.V. Goncharov. Refraction of sound in a horizontally inhomogeneous, time-dependent ocean. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(2):384–401, 2006.
- [HA73] D.B. Heckman y R.C. Abbott. An acoustic navigation technique. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering in the Ocean*

- Environment (Ocean 73)*, pages 591–595. Seattle, Estados Unidos, septiembre, 1973.
- [Hal89] M.V. Hall. A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(3):1103–1117, 1989.
- [Har97] C.H. Harrison. CANARY: a simple model of ambient noise and coherence. *Applied Acoustics*, 51(3):289–315, 1997.
- [HL93] D.R. Haller y D.D. Lemon. Sidescan sonar detection performance with PRN coded signals. En *Proceedings of the OCEANS 1993 Conference*, volume 1, pages 237–242, octubre, 1993.
- [HMM<sup>+</sup>74] M.M. Hunt, W.M. Marquet, D.A. Moller, K.R. Peal, W.K. Smith y R.C. Spindel. An acoustic navigation system. Technical Report WHOI-74-6, 1974.
- [HPvC93] K. Audenaert H. Peremans y J. van Campenhout. A high resolution sensor based on tri-aural perception. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1):36–48, 1993.
- [HYBD08] J.M. Hovem, S. Yan, X. Bao y H. Dong. Modeling underwater communication links. En *Proceedings of the Second International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pages 679–686. Cap Esterel, Francia, septiembre, 2008.
- [Isk08] C.D. Iskander. A matlab-based object-oriented approach to multipath fading channel simulation. Matlab File Exchange, consultado por última vez el 9 de diciembre de 2013, 2008.
- [JDM<sup>+</sup>10] A.D. Jones, A.J. Duncan, A. Maggi, J. Sendt y P.A. Clarke. Modelling acoustic reflection loss at the ocean surface for small angles of incidence. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [Jen88] F.B. Jensen. Wave theory modeling: A convenient approach to CW and pulse propagation modeling in low-frequency acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 13(4):186–197, 1988.
- [JF79] F.B. Jensen y M.C. Ferla. Snap: The saclantcen normal-mode acoustic propagation model. SACLANTCEN Memorandum SM-121, 1979.
- [JGHV03] B. Jalving, K. Gade, O.K. Hagen y K. Vestgård. A toolbox of aiding techniques for the hugin auv integrated inertial navigation system. En *Proceedings of the 2003 OCEANS Conference*, volume 2, pages 1146–1153. San Diego, Estados Unidos, septiembre, 2003.

- [JKPS11] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter y H. Schmidt. *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2a ed., Nueva York, EEUU, 2011.
- [JPD10] W. Jinjin, C. Ping y Y. Dong. An underwater acoustic channel simulator for UUV communication performance testing. En *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, pages 2286–2290, junio, 2010.
- [JPS<sup>+</sup>00] S.M. Jesus, M.B. Porter, Y. Stéphan, X. Démoulin, O.C. Rodríguez y E.M.M. Ferreira. Single hydrophone source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(3):337–346, 2000.
- [Jr.02] William Alameda Jr. SEADeViL a totally integrated inertial navigation system (INS) solution. En *Proceedings of the 2002 Underwater Intervention Symposim*. Nueva Orleans, Estados Unidos, marzo, 2002.
- [JT03] M.P. Johnson y P.L. Tyack. A digital acoustic recording tag for measuring the response of wild marine mammals to sound. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28(1):3–12, 2003.
- [JZLW08] Y.J. Jian, J. Zhang, Q.S. Liu y Y.F. Wang. Effect of mesoscale eddies on underwater sound propagation. *Applied Acoustics*, 70:432–440, 2008.
- [Kas68] T. Kasami. Weight distribution formula for some class of cyclic codes. Technical Report R-285, Coordinated Science Lab. University of Illinois, 1968.
- [KCZ05] N.H. Kussat, C.D. Chadwell y R. Zimmerman. Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1):153–164, 2005.
- [Kee00] R.E. Keenan. An introduction to GRAB eigenrays and CASS reverberation and signal excess. En *Proceedings of the OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 1065–1070. Providence, EEUU, septiembre, 2000.
- [KEW06] J.C. Kinsey, R.M. Eustice y L.L. Whitcomb. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges. En *IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*. Lisboa, Portugal, 2006.
- [KFCS00] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens y J.V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, 4a ed., Estados Unidos, 2000.
- [KFO11] M. Kido, H. Fujimoto y Y. Osada. Signal processing of acoustic ranging in GPS/acoustic seafloor geodesy. En *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. Tokio, Japón, abril, 2011.

- [KPPP88] W.A. Kuperman, M.B. Porter, J.S. Perkins y A.A. Piacsek. Rapid three-dimensional ocean acoustic modeling of complex environments. En *Proceedings of the 12th World Congress on Scientific Computation*, pages 231–233, 1988.
- [Lab13] National Physical Laboratory. Technical guides - speed of sound in sea-water. Disponible en: <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater/>, consultada el 1 de diciembre de 2012, 2013.
- [LB82] D. Lee y G. Botseas. IFD: An implicit finite-difference computer model for solving the parabolic equation. NUSC Technical Report 6659, 1982.
- [LBP81] D. Lee, G. Botseas y J.S. Papadakis. Finite-difference solution to the parabolic wave equation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3):795–800, 1981.
- [LBSF98] J.J. Leonard, A.A. Bennett, C.M. Smith y H.J.S. Feder. Autonomous underwater vehicle navigation. MIT Marine Robotics Laboratory Technical Memorandum 98-1, 1998.
- [LCF97] G. Loubet, V. Capellano y R. Filipiak. Underwater spread-spectrum communications. En *Proceedings of the OCEANS 1997 Conference*, volume 1, pages 574–579, Halifax, Canadá, octubre 1997.
- [LCLL96] G. Lachapelle, M.E. Cannon, G. Lu y B. Loncarevic. Shipborne GPS attitude determination during MMST-93. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(1):100–105, 1996.
- [LCLS49] R.W. Leonard, P.C. Combs y Jr. L.R. Skidmore. The attenuation of sound in synthetic sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 21:63, 1949.
- [LCR10] H.Q. Liu, M. Chitre y G. Rui. Auv positioning based on interactive multiple model. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [Lei98] T.G. Leighton. Fundamentals of underwater acoustics. En F. Fahy y J. Walker, editors, *Fundamentals of Noise and Vibration*, pages 373–443. E & FN Spon, 1998.
- [LK64] R.M. Lewis y J.B. Keller. Asymptotic methods for partial differential equations: The reduced wave equation and Maxwell's equations. New York University Research Report EM-194, 1964.
- [LLL<sup>+</sup>11] H.C. Lee, C.Y. Lin, C.H. Lin, S.W. Hsu y C.T. King. A low-cost method for measuring surface currents and modeling drifting objects. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 60(3):980–989, 2011.

- [LLZ04] F. Li, J. Liu y R. Zhang. A model/data comparison for shallow-water reverberation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4):1060–1066, 2004.
- [LP80] D. Lee y J.S. Papadakis. Numerical solutions of the parabolic wave equation: An ordinary-differential-equation approach. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5):1482–1488, 1980.
- [LP98] C.C. Leroy y F. Parthiot. Depth-pressure relationships in the oceans and seas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3):1346–1352, 1998.
- [LPD78] D. Lee, J.S. Papadakis y F.R. DiNapoli. Numerical solutions of underwater acoustic wave propagation problems. En *Journal of the Acoustical Society of America*, volume 63, S1, page S26, 1978.
- [LSC02] D. Loebis, R. Sutton y J. Chudley. Review of multisensor data fusion techniques and their application to autonomous underwater vehicle navigation. En *Proceedings of IMarEST - Part A - Journal of Marine Engineering and Technology*, volume 1, pages 3–14, 2002.
- [Lud66] D. Ludwig. Uniform asymptotic expansions at a caustic. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 19(2):215–250, 1966.
- [IUM+06] F.J. Álvarez, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, J.J. García y C. De Marziani. High reliability outdoor sonar prototype based on efficient signal coding. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 53(10):1862–1871, 2006.
- [Álv05] F.J. Álvarez. *Codificación de Emisiones Ultrasónicas con Secuencias Complementarias para su Uso en Exteriores*. Tesis doctoral, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2005.
- [Mac81] K.V. Mackenzie. Discussion of sea water sound-speed determinations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3):801–806, 1981.
- [Mah00] B.R. Mahafza. *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*. Chapman & Hall/CRC, 1a ed., Boca Ratón, Florida, Estados Unidos, 2000.
- [Man02] R. Mancini. Op Amps for everyone. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>, consultado el 11 de diciembre de 2013, 2002.
- [Mar63] H.W. Marsh. Origin of the Knudsen spectra. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35:409–410, 1963.
- [Mar06] C.M. De Marziani. *Sistema de Localización Acústico empleando Conjuntos de Secuencias Complementarias*. Tesis doctoral, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2006.

- [MB10] A. Myagotin y I. Burdinsky. Auv positioning model employing acoustic and visual data processing. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [MFJ04] R. Marthiniussen, J.E. Faugstadmo y H.P. Jakobsen. Hain, an integrated acoustic positioning and inertial navigation system. En *Proceedings of the 2004 OCEANS Conference*, volume 3, pages 1620–1628, noviembre, 2004.
- [MIN00] J.T. Mian, T. Ishimatsu y Y. Nagashima. Compact underwater vehicle with acoustic link for communication and positioning. En *Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology*, pages 237–241, 2000.
- [Mio11] Mio Technology. GPS accuracy and error sources. Disponible en <http://www.mio.com/technology-gps-accuracy.htm>, consultado por última vez el 19 de mayo de 2014, 2011.
- [MJ97] D.E. Di Massa y W.K. Stewart Jr. Terrain-relative navigation for autonomous underwater vehicles. En *Proceedings of the 1997 OCEANS Conference*, volume 1, pages 541–546. Halifax, Canadá, octubre, 1997.
- [MJPW10] L. Medagoda, M.V. Jakuba, O. Pizarro y S.B. Williams. Water column current profile aided localisation for autonomous underwater vehicles. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [MKS85] H. Mitome, T. Koda y S. Shibata. An acoustic positioning system using demodulated signals of an FM ultrasonic wave. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 10(3):316–323, 1985.
- [MLBD02] M. Meyer, H. Lee, A. Barr y M. Desbrun. Generalized barycentric coordinates on irregular polygons. *Journal of Graphics Tools*, 7:13–22, 2002.
- [MM08] J. Melo y A. Matos. Guidance and control of an ASV in AUV tracking operations. En *Proceedings of the 2008 OCEANS Conference*. Quebec, Canadá, septiembre, 2008.
- [MOSV07] M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre y J.F. Vasconcelos. Vehicle dynamics aiding technique for USBL/INS underwater navigation system. En *Proceedings of the 7th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, volume 7, part 1, pages 111–116. Croacia, septiembre, 2007.
- [MR63] R.F. Meyer y B.W. Romberg. Acoustic scattering in the ocean. Project Trident Technical Report No. 1360863, 1963.
- [MTWP05] R. McEwen, H. Thomas, D. Weber y F. Psota. Performance of an AUV navigation system at arctic latitudes. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2):443–454, 2005.

- [MUH<sup>+</sup>09] C. De Marziani, J. Ureña, A. Hernández, M. Mazo, J.J. García, A. Jiménez, M.C. Pérez, F. Álvarez y J.M. Villadangos. Acoustic sensor network for relative positioning of nodes. *Sensors*, 9:8490–8507, 2009.
- [MUH<sup>+</sup>12] C. De Marziani, J. Ureña, A. Hernández, J.J. García, F.J. Álvarez, A. Jiménez, C. Pérez, J.M. Villadangos, J. Aparicio, y R. Alcoleas. Simultaneous round-trip time-of-flight measurements with encoded acoustic signals. *IEEE Sensors Journal*, 12(10):2931–2940, 2012.
- [MUM<sup>+</sup>06] C. De Marziani, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, J.J. García, A. Jiménez, M.C. Pérez, A. Ochoa y J.M. Villadangos. Relative positioning system using simultaneous round trip time of flight measurements. En *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 602–605. Praga, República Checa, septiembre, 2006.
- [Mun80] W.H. Munk. Horizontal deflection of acoustic paths by mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 10:596–604, 1980.
- [MW97] C.S. Meinen y D.R. Watts. Further evidence that the sound-speed algorithm of del grosso is more accurate than that of chen and millero. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4):2058–2062, 1997.
- [Nat14] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Disponible en <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>, consultado por última vez el 19 de mayo de 2014, 2014.
- [NDW98] P. Newman y H. Durrant-Whyte. Using sonar in terrain-aided underwater navigation. En *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, volume 1, pages 440–445. Lovaina, Bélgica, mayo, 1998.
- [NHHZ78] A. Nagl, H.Überall, A.J. Haug y G.L. Zarur. Adiabatic mode theory of underwater sound propagation in a range-dependent environment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(3):739–749, 1978.
- [NPDT84] L. Nghiem-Phu, S.C. Daubin y F.D. Tappert. A high-speed, compact, and interactive parabolic equation solution generator (PESOGEN) system. En *Journal of the Acoustical Society of America*, volume 75, S1, page S26, 1984.
- [Ogu94] H.N. Oguz. A theoretical study of low-frequency oceanic ambient noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95(4):1895–1912, 1994.
- [oNR12] U.S. Office of Naval Research. Ocean acoustic library. <http://oalib.hlsresearch.com/>, 2012.

- [OWL54] Jr. O.B. Wilson y R.W. Leonard. Measurements of sound absorption in aqueous salt solutions by a resonator method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 26(2):223–226, 1954.
- [PB82] J.S. Perkins y R.N. Baer. An approximation to the three-dimensional parabolic-equation method for acoustic propagation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(2):515–522, 1982.
- [PB87] M.B. Porter y H.P. Bucker. Gaussian beam tracing for computing the ocean acoustic fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4):1349–1359, 1987.
- [PBJ<sup>+</sup>02] M. Palmese, A. Bozzo, S.M. Jesus, J. Onofre, P. Picco y A. Trucco. Observation of acoustical signal fluctuations by time-frequency analysis methods. En *Proceedings of the 2002 European Conference on Underwater Acoustics*, pages 755–760. Gdansk, Polonia, 2002.
- [PDJ<sup>+</sup>13] W. Ping, F. Donghao, X. Jianchun, Y. Qiliang, W. Ronghao y W. Wenhao. An improved mac protocol for underwater acoustic networks. En *Proceedings of the 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 2897–2903. Guiyang, China, 2013.
- [PG91] H. Primack y K.E. Gilbert. A two-dimensional downslope propagation model based on coupled wedge modes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(6):3254–3262, 1991.
- [Pie65] A.D. Pierce. Extension of the method of normal modes to sound propagation in an almost-stratified medium. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37(1):19–27, 1965.
- [PL94] M.B. Porter y Y.C. Liu. Finite-element ray tracing. En *Proceedings of the International Conference on Theoretical and Computational Acoustics*, volume 2, pages 947–956, 1994.
- [Pla98] A. Plaisant. Long range acoustic communications. En *Proceedings of the OCEANS 1998 Conference*, volume 1, pages 472–476, octubre, 1998.
- [PMA09] D. Pompili, T. Melodia y I.F. Akyildiz. A CDMA-based medium access control for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(4):1899–1909, 2009.
- [Por90] M.B. Porter. The time-marched fast-field program (FFP) for modeling acoustic pulse propagation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(5):2013–2023, 1990.
- [Por93] M.B. Porter. Acoustic models and sonar systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(4):425–437, 1993.



- [Por10] M.B. Porter. The KRAKEN normal mode program (draft). Disponible en: <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/kraken.pdf>, consultado el 27 de septiembre de 2012, 2010.
- [Por11] M. Porter. The BELLHOP manual and user's guide: Preliminary draft. Disponible en: <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/HLS-2010-1.pdf>, consultado el 1 de agosto de 2012, 2011.
- [Pér09] M.C. Pérez. *Generación y Correlación Eficiente de Códigos Binarios Derivados de Conjuntos de Secuencias Complementarias para Sistemas Ultrasónicos*. Tesis doctoral, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2009.
- [Pre06] J. Preisig. Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development. En *Proceedings of the WUWNet 2006*. Los Ángeles, Estados Unidos, septiembre, 2006.
- [PRM<sup>+</sup>09] S.P. Pecknold, W.M. Renaud, D.R. McGaughey, J.A. Theriault y R.F. Marsden. Improved active sonar performance using costas waveforms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(4):559–574, 2009.
- [PRS01] J.G. Proakis, J.A. Rice y M. Stojanovic. Shallow water acoustic networks. *IEEE Communications Magazine*, 39(11):114–119, 2001.
- [PS02] J.G. Proakis y M. Salehi. *Communication Systems Engineering*. Prentice Hall, 1a ed., Nueva Jersey, 2002.
- [PT11] R. Panish y M. Taylor. Achieving high navigation accuracy using inertial navigation systems in autonomous underwater vehicles. En *Proceedings of the 2011 OCEANS Conference*. Santander, España, junio, 2011.
- [RAJS89] J.S. Robertson, D.C. Artney, M.J. Jacobson y W.L. Siegmann. An efficient enhancement of finite-difference implementations for solving parabolic equations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(1):252–260, 1989.
- [RC70] W.I. Roderick y B.F. Cron. Frequency spectra of forward-scattered sound from the ocean surface. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 48(3B):759–766, 1970.
- [RC05] Defence Research y Development Canada. An investigation of the bellhop acoustic prediction model: Capabilities, tests, recommendations and user guide. Disponible en: <http://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc48/p525115.pdf>, consultado el 11 de septiembre de 2012, 2005.
- [RCZ09] A.P. Rosenberg, D. Chizhik y Q. Zhang. High frequency rough surface parabolic equation modeling for underwater acoustic communications. En

- IEEE Military Communications Conference (MILCOM) 2009*, page 6 páginas, octubre, 2009.
- [Roa05] J.O. Roa. Localización 3D basada en técnicas de trilateración y optimización en la ubicación de balizas, aplicados a la navegación de robots móviles en entornos estructurados. Trabajo de Investigación Tutelado. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2005.
- [RUG<sup>+</sup>13] D. Ruiz, J. Ureña, J.C. García, C. Pérez, J.M. Villadangos y E. García. Efficient trilateration algorithm using time differences of arrival. *Sensors and Actuators A: Physical*, 193:220–232, 2013.
- [Rui11] F.D. Ruiz. *Localización y Autocalibrado Simultáneo con Sistemas de Posicionamiento Local Ultrasónicos*. Tesis doctoral, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 2011.
- [SBW96] G.A. Scanlon, R.H. Bourke y J.H. Wilson. Estimation of bottom scattering strength from measured and modeled mid-frequency sonar reverberation levels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 21(4):440–451, 1996.
- [SCE<sup>+</sup>96] H. Singh, J. Catipovic, R. Eastwood, L. Freitag, H. Henriksen, F. Hover, D. Yoerger, J.G. Bellingham y B.A. Moran. An integrated approach to multiple auv communications, navigation and docking. En *Proceedings of the 1996 OCEANS Conference*, volume 1, pages 59–64. Fort Lauderdale, Estados Unidos, septiembre, 1996.
- [Sch88] H. Schmidt. SAFARI: Seismo-acoustic fast field algorithm for range-independent environments. user's guide. SACLANTCEN Report SR-113, 1988.
- [Sch91] H. Schmidt. Numerical modeling in ocean seismo-acoustics. En *Proceedings of the 1991 OCEANS Conference*, volume 1, pages 84–92, octubre, 1991.
- [Sea10] Sea-Bird Electronics, Inc. Application Note No. 27: Minimizing strain gauge pressure sensor errors. Disponible en: [http://www.seabird.com/application\\_notes/AN27.htm](http://www.seabird.com/application_notes/AN27.htm), consultado por última vez el 14 de mayo de 2014, 2010.
- [Seo90] W. Seong. Hybrid galerkin boundary element - wavenumber integration method for acoustic propagation in laterally inhomogeneous media. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Oceánica, Massachusetts Institute of Technology (Estado Unidos), 1990.
- [SF06] M. Stojanovic y L. Freitag. Multichannel detection for wideband underwater acoustic cdma communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(3):685–695, 2006.

- [SGS03] F. Salvá-Garau y M. Stojanovic. Multi-cluster protocol for ad hoc mobile underwater acoustic networks. En *Proceedings of the 2003 OCEANS Conference*, volume 1, pages 91–98, septiembre, 2003.
- [SH06] H. Shyu y R. Hillson. A software workbench for estimating the effects of cumulative sound exposure in marine mammals. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(1):8–21, 2006.
- [SJM87] W.L. Siegmann, M.J. Jacobson y L.D. Law. Effects of bottom attenuation on acoustic propagation with a modified ray theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(6):1741–1751, 1987.
- [SLBS97] C.M. Smith, J.J. Leonard, A.A. Bennett y C. Shaw. Feature-based concurrent mapping and localization for AUVs. En *Proceedings of the 1997 OCEANS Conference*, volume 2, pages 896–901. Halifax, Canadá, octubre, 1997.
- [SLP10] F. Socheleau, C. Laot y J. Passerieux. A maximum entropy framework for statistical modeling of underwater acoustic communication channels. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*, page 7 páginas. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [SMC08] N. Santos, A. Matos y N. Cruz. Navigation of an autonomous underwater vehicle in a mobile network. En *Proceedings of the OCEANS 2008 Conference*, septiembre, 2008.
- [Smi03] K.B. Smith. Convergence, stability, and variability of shallow water acoustic predictions using a split-step fourier parabolic equation model. Disponible en: <http://oalib.hlsresearch.com/PE/MMPE/SWAM99rev.pdf>, consultado el 29 de octubre de 2012, 2003.
- [SNI09] K. Shimoo, Y. Nagashima y T. Ishimatsu. Compact underwater vehicle with accurate positioning system. En *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 2083–2088, agosto, 2009.
- [Som58] D.M.Y. Sommerville. *An Introduction to the Geometry of n Dimensions*. Dover Publications, Mineola, Nueva York, 1958.
- [Spi93] J.L. Spiesberger. Is Del Grosso’s sound-speed algorithm correct? *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4):2235–2237, 1993.
- [SPMD76] R.C. Spindel, R.P. Porter, W.M. Marquet y J.L. Durham. A high-resolution pulse-doppler underwater acoustic navigation system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1(1):6–13, 1976.
- [SPS+99] E.M. Sozer, J.G. Proakis, M. Stojanovic, J.A. Rice, A. Benson y M. Hatch. Direct sequence spread spectrum based modem for under water acoustic

- communication and channel measurements. En *Proceedings of the 1999 OCEANS Conference*, volume 1, pages 228–233, septiembre, 1999.
- [Sta12] M.J. Stanway. *Contributions to Automated Realtime Underwater Navigation*. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology y Woods Hole Oceanographic Institution, 2012.
- [Sto03] M. Stojanovic. Acoustic (underwater) communications. En J.G. Proakis, editor, *Encyclopedia of Telecommunications, Vol. 1*, pages 36–47. John Wiley & Sons, 2003.
- [Tap77] F.D. Tappert. The parabolic approximation method. En *Lecture Notes in Physics*, pages 224–287. Springer, 1977.
- [Tap83] F.D. Tappert. Hyper: A hybrid parabolic equation-ray model for high-frequency underwater sound propagation. En *Journal of the Acoustical Society of America*, volume 74, S1, page S96, 1983.
- [TB81] C.T. Tindle y G.E.J. Bold. Improved ray calculations in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3):813–819, 1981.
- [TC83] D.J. Thomson y N.R. Chapman. A wide-angle split-step algorithm for the parabolic equation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74(6):1848–1854, 1983.
- [TD85] C.T. Tindle y G.B. Deane. Sound propagation over a sloping bottom using rays with beam displacement. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4):1366–1374, 1985.
- [TE02] D. Tollefsen y E.J. Eidem. Matched-field localization of explosive sources in the barents sea using a horizontal array. En *Proceedings of the 2002 MTS/IEEE OCEANS Conference*, volume 3, pages 1372–1376. Biloxi, EEUU, octubre, 2002.
- [TEM97] D.J. Thomson, G.R. Ebbeson y B.H. Maranda. A matched-field backpropagation algorithm for source localization. En *Proceedings of the 1997 MTS/IEEE OCEANS Conference*, volume 1, pages 602–607. Halifax, Canadá, octubre, 1997.
- [The14] The Engineering Toolbox. Speed of sound in some common solids. Disponible en: [http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d\\_713.html](http://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d_713.html), consultado el 8 de mayo de 2014, 2014.
- [Tho67] W.H. Thorp. Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42(1):270, 1967.

- [Tho98] H.G. Thomas. GIB buoys: An interface between space and depths of the oceans. En *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, pages 181–184. Cambridge, Estados Unidos, agosto, 1998.
- [THSA00] C.C. Tsimenidis, O.R. Hinton, B.S. Sharif y A.E. Adams. Spread-spectrum based adaptive array receiver algorithms for the shallow-water acoustic channel. En *Proceedings of the 2000 MTS/IEEE OCEANS Conference*, volume 2, pages 1233–1237, septiembre, 2000.
- [TL72] C-C. Tseng y C.L. Liu. Complementary sets of sequences. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-18(5):644–652, 1972.
- [TLW84] F.D. Tappert, D. Lee y H. Weinberg. High-frequency propagation modeling using hyper. En *Journal of the Acoustical Society of America*, volume 75, S1, page S30, 1984.
- [Tor52] W.S. Torgerson. Multidimensional Scaling: I. Theory and Method. *Psychometrika*, 17:401–419, 1952.
- [TR05] F. Thomas y L. Ros. Revisiting trilateration for robot localization. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(1):93–101, 2005.
- [TZ97] C.T. Tindle y Z.Y. Zhang. An adiabatic normal mode solution for the benchmark wedge. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(1):606–609, 1997.
- [UAP97] M. Uliana, F. Andreucci y B. Papalia. The navigation system of an autonomous underwater vehicle for antarctic exploration. En *Proceedings of the 1997 OCEANS Conference*, volume 1, pages 403–408. Halifax, Canadá, octubre, 1997.
- [ULB69] R.J. Urick, G.R. Lund y D.L. Bradley. Observations of fluctuations of transmitted sound in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 45(3):683–690, 1969.
- [Ure98] J. Ureña. *Contribución al diseño e implementación de un sistema sónar para la automatización de un vehículo industrial*. Tesis doctoral, Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 1998.
- [Uri74] R.J. Urick. Sea-bed motion as a source of the ambient noise background of the sea. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(3):1010–1011, 1974.
- [Uri83] R.J. Urick. *Principles of Underwater Sound*. Peninsula Publishing, 3a ed., Estados Unidos, 1983.
- [Val13] Valeport Limited. MiniIPS intelligent pressure sensor. Disponible en: <http://www.valeport.co.uk/Portals/0/Docs/Datasheets/>

- Valeport\_miniIPS\_v2b.pdf, consultado por última vez el 14 de mayo de 2014, 2013.
- [VBL98] J. Vaganay, J.G. Bellingham y J.J. Leonard. Comparison of fix computation and filtering for autonomous acoustic navigation. *International Journal of Systems Science*, 29(10):1111–1122, 1998.
- [Vic98] K. Vickery. Acoustic positioning systems: A practical overview of current systems. En *Proceedings of the Dynamic Positioning Conference*, octubre, 1998.
- [Wei75] H. Weinberg. Application of ray theory to acoustic propagation in horizontally stratified oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 58(1):97–109, 1975.
- [Wen62] G.M. Wenz. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12):1936–1956, 1962.
- [Wil60] W.D. Wilson. Equation for the speed of sound in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 32(10):1357, 1960.
- [WK96] H. Weinberg y R.E. Keenan. Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow-water conditions. NUWC-NPT Technical Report 10,568, 1996.
- [WLB07] T.C. Weber, A.P. Lyons y D.L. Bradley. Acoustic propagation through clustered bubble clouds. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(2):513–523, 2007.
- [WM06] S. Williams y I. Mahon. A terrain-aided tracking algorithm for marine systems. *Field and Service Robotics*, 24:93–102, 2006.
- [WMPH09] E. Willemenot, P. Morvan, H. Pelletier y A. Hoof. Subsea positioning by merging inertial and acoustic technologies. En *Proceedings of the 2009 OCEANS Conference*. Bremen, Alemania, 2009.
- [WOS08] Y. Watanabe, H. Ochi y T. Shimura. An experiment of underwater acoustic positioning with data transmission using DSSS. En *Proceedings of the 2008 OCEANS Conference*, 2008.
- [WSBH11] L.M. Wolff, E. Szczepanski y S. Badri-Hoehner. Acoustic underwater channel and network simulator. En *Proceedings of the 2012 OCEANS Conference*. Yeosu, Corea del Sur, 2011.
- [WTS11] M. Waldmeyer, H. Tan y W.K.G. Seah. Multi-stage auv-aided localization for underwater wireless sensor networks. En *Workshops of International*

- Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pages 908–913, matzo, 2011.
- [WYSM98] L. Whitcomb, D. Yoerger, H. Singh y D. Mindell. Towards precision robotic maneuvering, survey, and manipulation in unstructured undersea environments. En *Robotics Research - The Eighth International Symposium*. Londres, Reino Unido, 1998.
- [XGD10] K.C. Xu, Y.J. Guo y E. Dutkiewicz. Swimmer tracking with underwater acoustic networks. En *Proceedings of the 2010 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pages 1045–1049, octubre, 2010.
- [XGDG06] G. Xie, J. Gibson y L. Diaz-Gonzalez. Incorporating realistic acoustic propagation models in simulation of underwater acoustic networks: A statistical approach. En *Proceedings of the MTS/IEEE 2006 OCEANS Conference*, septiembre, 2006.
- [Yan04] T.C. Yang. Differences between passive-phase conjugation and decision-feedback equalizer for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(2):472–487, 2004.
- [YBM<sup>+</sup>99] X. Yun, E.R. Bachmann, R.B. McGhee, R.H. Whalen, R.L. Roberts, R.G. Knapp, A.J. Healey y M.J. Zyda. Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for small AUV navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(3):396–404, 1999.
- [YFBJ10] G. Yuliang, Z. Fengnian, X. Baohua y Z. Jianhu. Design and application of buoy system for on-the-fly observation of surface current in closure water area. En *Proceedings of the 2010 OCEANS Conference*, page 4 páginas. Sidney, Australia, mayo, 2010.
- [YJBB07] D.R. Yoerger, M. Jakuba, A.M. Bradley y B. Bingham. Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle. *International Journal of Robotics Research*, 26(1):41–54, 2007.
- [Yod13] N. Yoder. Peakfinder. File Exchange de Matlab, disponible en <http://www.mathworks.es/matlabcentral/fileexchange/25500-peakfinder>, último acceso el 9 de mayo de 2014, 2013.
- [You92] J.W. Youngberg. Method for extending GPS to underwater applications. US Patent Number 5119341, 1992.
- [ZHDL10] G. Zhang, J.M. Hovem, H. Dong y L. Liu. Experimental studies of underwater acoustic communications over multipath channels. En *Conference*

---

*Publications of the Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pages 458–461, julio, 2010.

- [ZS08] G. Zhou y T. Shim. Simulation analysis of high speed underwater acoustic communication based on a statistical channel model. En *Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing*, volume 5, pages 512–517, mayo, 2008.
- [ZYW95] A. Zielinski, Y.H. Yoon y L. Wu. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 20(4):293–299, 1995.