

# **MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS EN LA CAPA SUPERFICIAL EN LA BAHÍA INTERNA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA.**



**Ing. William Ramón Cuadrado Cano**

Trabajo de grado:  
**MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRÓNICA**

Director:  
**Ing. Juan Antonio Contreras Montes, PhD**

**Universidad del Cauca.**  
En convenio con:  
**Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" – Cartagena.**  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.**  
**Señales y Sistemas de Comunicaciones.**  
**Cartagena, mayo de 2021.**

# MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS EN LA CAPA SUPERFICIAL EN LA BAHÍA INTERNA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA.

Ing. William Ramón Cuadrado Cano

Trabajo de grado para la obtención del título de:

Magister en:  
INGENIERIA ELECTRÓNICA

Director:  
Ing. Juan Antonio Contreras Montes, PhD

Universidad del Cauca  
En convenio con  
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" - Cartagena  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Señales y Sistemas de Comunicaciones  
Cartagena, mayo de 2021

# Hoja de aprobación.

## **Dedicatoria.**

*Marco Antonio, padre dedico este gran triunfo a tu memoria, porque ahora al pasar los años, a mis años, reconozco tu gran esfuerzo y dedicación por sacar a delante a tus hijos, aun te recuerdo al lado de Escolástica...*

# Agradecimientos.

Deseo agradecer primero que todo al todo poderoso, por darme una segunda oportunidad de vivir la vida y terminar metas aun sin cumplir.

Agradezco a mis amigos y compañeros de toda una vida, Juan Contreras y Alcides Ramos, incondicionales con sus aportes en conocimientos y en hechos, gracias porque sin ustedes este proyecto no hubiese arrancado y menos culminado.

Agradecimientos a la Escuela Naval Almirante Padilla por la oportunidad que me han dado al permitirme realizar estos estudios y por el apoyo prestado al ceder sus instalaciones y equipos para la realización del proyecto.

Gracias a los Docentes de la Universidad del Cauca, por su paciencia e interés en compartir sus conocimientos de manera desinteresada; en especial al Ing. Alejandro Toledo, por tu apoyo en todo momento.

En fin, en este momento seguramente se me escapan nombres y situaciones, pero sepan que estoy infinitamente agradecido con todos ustedes.

....

# Resumen.

El proyecto busca obtener un modelo analítico del canal acústico submarino de la capa superficial de la bahía de Cartagena. En pocas palabras se busca establecer un programa que permita predecir el comportamiento de las comunicaciones digitales en una masa de agua salada que oscila aproximadamente entre los 0 – 15 metros de profundidad, en la bahía interna de la bahía.

El fruto de este proyecto es una herramienta, que permite simular diferentes escenarios de comunicaciones acústicas submarinas, que, aunque tiene sus limitantes como es el hecho de proponer comunicaciones en espacio libre, contar con transductor e hidrófono a una misma profundidad, estar diseñado para operar en la capa <superficial, es un programa abierto para poder continuar otras investigaciones en el área de las comunicaciones digitales submarinas.

A manera de ejemplo, consideremos que puede ser utilizado como una plataforma donde docentes e investigadores podrían incursionar en temas como adicionar y probar diferentes códigos de fuentes y de canal u otras modulaciones con el objetivo de mejorar la calidad de las comunicaciones.

Finalmente, y no menos importante, durante las simulaciones se pudo constatar que el programa cumple con reglas de oro, por todos conocidas, pero que es bueno verificar si el simulador lo cumple también.

Se verificaron varias de ellas:

- La tasa de error de bit (BER) aumenta con la distancia de separación entre Tx/Rx;
- La BER es inversamente proporcional al valor del cociente entre la energía de bit y el ruido específico;
- Además, se verificó que la tasa de error aumenta con la disminución del tiempo de bit,
- El viento sobre la superficie del mar, produce oleaje que tiene un marcado efecto perjudicial sobre las comunicaciones acústicas submarinas.
- La modulación ASK, no es, en definitiva, aconsejables para establecer sistemas de comunicaciones acústicas submarinas.

**Palabras Claves:** Comunicaciones acústicas submarinas

## Abstract.

The project seeks to obtain an analytical model of the underwater acoustic channel of the surface layer of the Cartagena beach. In short, it seeks to establish a program that allows predicting the behavior of digital communications in a mass of salt water that ranges approximately between 0 - 15 meters deep, in the internal bay of the bay.

The fruit of this project is to have a tool that allows simulating different underwater acoustic communication scenarios, which, although it has its limitations such as the fact of proposing communications in free space, having a transducer and hydrophone at the same depth, be designed to operate in the superficial layer is an open program to be able to continue other investigations in the area.

As an example, let us consider that it can be used as a platform where teachers and researchers could explore topics such as adding and testing different source and channel codes or other modulations with the aim of improving the quality of communications.

Lastly, and not least, during the simulations it was found that the program complies with golden rules, which are well known to all, but that it is good to verify if the simulator also complies with them.

Several of them were verified:

- The bit error rate (BER) increases with the separation distance between Tx / Rx;
- The BER is inversely proportional to the value of the quotient between the bit energy and the specific noise;
- In addition, it was verified that the error rate increases with the decrease of the bit time,
- The wind on the sea surface produces waves that have a marked detrimental effect on underwater acoustic communications.
- ASK modulation is definitely not advisable to establish underwater acoustic communication systems.

**Keywords:** Underwater acoustic communications

# Tabla de contenido

Lista de tablas. ....	11
Lista de Figuras. ....	13
Lista de Abreviaturas.....	17
Introducción.....	20
Formulación del problema. ....	20
Planteamiento del problema.....	20
Estado del Arte.....	22
1. Factores que afectan la propagación. ....	23
2. Modelo de propagación de la onda sonora en el medio subacuático.....	25
Aportes investigativos.....	26
Objetivos.....	27
Objetivo general. ....	27
Objetivos específicos.....	27
Organización del Trabajo de Grado.....	27
Cumplimiento del objetivo específico uno.....	27
Cumplimiento del objetivo específico dos.....	29
Cumplimiento del objetivo específico tres.....	29
Capítulo 1: Fundamentos de enlaces acústicos submarinos.....	31
1.1. Ondas Acústicas. ....	31
1.2. Presión Acústica. ....	32
1.3. Intensidad Acústica. ....	34
1.4. Nivel de Intensidad Sonora. ....	35
1.5. Nivel de la Fuente (Source Level SL).....	38
1.5.1. Relación Señal a Ruido.....	38
1.5.2. Rango dinámico. ....	38
1.5.3. Nivel espectral y Nivel de Banda (BL).....	39
1.6. Ruido en acústica submarina. ....	40
1.6.1. Ruido Ambiental (NL).....	40
1.7. Transductores e Hidrófonos.....	45
1.7.1. Características Operativas de los Transductor y los Hidrófonos.....	46
1.7.2. Relación entre las características operativas.....	47
1.7.3. Caracterización de la Celda Piezoeléctrica.....	48

1.8. Índice de Directividad (DI).....	51
1.8.1. Factor de Direccionalidad $H(\theta)$ .....	53
1.8.2. Patrón de Radiación $bp(\theta)$ . ....	56
1.8.3. Pistón Acústico Circular. ....	57
1.8.4. Fuente Lineal simple. ....	59
1.8.5. Relación entre el nivel de la Fuente SL, Potencia acústica e Índice de Directividad DI.....	60
1.9. Propagación del Sonido en el Océano.....	60
1.9.1. Velocidad del sonido en el mar. ....	61
1.9.2. Perfiles de Velocidad del sonido (Sound Speed Profiles SSP). ....	64
1.9.3. Representación de las ondas sonoras mediante Rayos Acústicos.....	68
1.10. Pérdidas por transmisión (TL). ....	72
1.10.1. Pérdidas por propagación o divergencia geométrica. ....	73
1.10.2. Pérdidas por absorción. ....	74
1.11. Umbral de Detección (DT).....	78
1.12. Ecuación del enlace transductor hidrófono.....	78
1.12.1. Parámetros determinados por los equipos.....	78
1.12.2. Parámetros determinados por el canal. ....	78
1.13 Variables que intervienen en la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino.....	80
1.13.1. Variables no susceptibles al control. ....	80
1.13.2. Variables susceptibles al control. ....	80
Capítulo 2: Descripción de la Bahía de Cartagena.....	81
2.1. Principales Características.....	82
2.1.1. Velocidad de los vientos durante las diferentes épocas del año.....	83
2.1.2. Temperatura. ....	83
2.1.3. Salinidad. ....	86
Capítulo 3: Parámetros de Transductor e Hidrófono. ....	90
3.1. Características importantes de las celdas piezoeléctricas. ....	90
3.1.1. Sensibilidad - Receiving Voltage Response (RVR).....	90
3.1.2. Transmitting Voltage Response (TVR).....	91
3.1.3. Índice Directivo (DI). ....	92
3.2. Características del Hidrófono RESON TC 4032.....	92
3.3. Características del Transductor Furuno.....	96
3.3.1. Métodos de calibración de Transductor. ....	96

3.3.2. Circuito equivalente del transductor. ....	103
3.4. Resumen del capítulo. ....	110
Capítulo 4: Simulación del fenómeno de propagación de las ondas sonora en la capa superficial en la bahía interna de la ciudad de Cartagena. ....	114
4.1 Condiciones bajo las cuales se realiza la simulación. ....	114
4.2 Instrumentos para la simulación. ....	117
4.2.1 Entradas y salidas y tránsito en el canal. ....	117
4.2.2 Introducción del ruido ambiental y la atenuación de la señal. ....	122
4.2.3 Modelo del canal acústico submarino. ....	125
4.2.4. Modulación de la señal con la Información. ....	127
4.3. Escenarios de simulación. ....	131
4.3.1. Tablas de variables ....	131
4.3.2. Escenarios contemplados ....	132
Conclusiones. ....	149
Bibliografía. ....	152
Apéndice A. ....	156
Apéndice B. ....	158
Apéndice C. ....	159
Apéndice D. ....	162
Apéndice E. ....	163
Apéndice F. ....	164
Apéndice G. ....	167
Apéndice H. ....	170
Apéndice I. ....	173
Apéndice J. ....	174
Apéndice K. ....	176
Apéndice L. ....	178

## Lista de tablas.

Tabla 1.	Otras expresiones experimentales para el cálculo de la velocidad del sonido en el océano .....	64
Tabla 2.	Características del hidrófono RESON TC 4032.....	93
Tabla 3.	Datos experimentales obtenidos en la aplicación del Método de comparación directa donde la distancia entre transductor e hidrófono es de 0.37yd (0.40m) .....	101
Tabla 4.	Datos experimentales obtenidos del Circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia $f_r$ , donde el valor de $R_1$ es de $50\Omega$ , la frecuencia de resonancia $f_r = 57.50\text{KHz}$ , $R_m = 12.66\Omega$ .....	104
Tabla 5.	Datos experimentales obtenidos del Circuito para el cálculo de la frecuencia de anti resonancia $f_a$ .....	108
Tabla 6.	Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación ASK .....	132
Tabla 7.	Comportamiento del modelo ante variación del ancho del pulso de la señal digital .....	133
Tabla 8.	Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK .....	134
Tabla 9.	Variación de BER, al considerar diferentes tiempos de $T_b$ en la señal modulante .....	135
Tabla 10.	Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK .....	136
Tabla 11.	Resultados el escenario 2. Donde se permite alejarse el hidrófono desde 1m hasta 90 metros, y en cada punto se hace variar el voltaje desde 1 a 15 v, registrándose el valor obtenido de la BER .....	137
Tabla 12.	Categorización de los vientos .....	138
Tabla 13.	Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK .....	140
Tabla 14.	Resultados de la simulación en busca de la relación entre los vientos y la BER .....	141
Tabla 15.	Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK. ....	143
Tabla 16.	Resultados el escenario 2. Donde se permite alejarse el hidrófono desde 1m hasta 90 metros, y en cada punto se hace variar el voltaje desde 1 a 15 v, registrándose el valor obtenido de la BER.....	144
Tabla 17.	Categorización de los vientos. Fuente: Proyecto de grado: Desarrollo de un método de comparación de sistemas de sonar para plataformas de superficies; Capitán Andrés Cortes y Capitán Ennio Emmanuel Pinzón Villaroel, Escuela Naval Almirante Padilla Cartagena 2012) .....	145

Tabla 18. Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK, enfrentado vientos en las cuatro categorías de la tabla 17. ....	145
Tabla 19. Resultados de la simulación en busca de la relación entre los vientos y la BER. ....	146

# Lista de Figuras.

Figura 1.	Concepto de las zonas de compresión y expansión generadas por los transductor en las fronteras de sus caras de contacto con el agua marina.....	32
Figura 2.	Principales parámetros de la onda de Presión Acústica .....	34
Figura 3.	Definición del Nivel de Fuente, es el valor del SPL a una distancia de 1Yd, medido a partir del transductor .....	38
Figura 4.	Definición del rango dinámico .....	39
Figura 5.	Muestra el ruido ambiental debido a las Turbulencias en dB rel 1μPa....	42
Figura 6.	Se presenta el Ruido ambiental debido a tráfico Marítimo para el caso de tráfico ligero, moderado e intenso .....	43
Figura 7.	Se presenta el Ruido ambiental debido al Oleaje para el caso de vientos de 1,4,11 y 28 nudos .....	44
Figura 8.	Se presenta el Ruido ambiental térmico .....	45
Figura 9.	Se presentan la equivalencia entre los parámetros operativos RVR y RCR.....	48
Figura 10.	Se presentan la equivalencia entre los parámetros operativos TVR y TCR.....	48
Figura 11.	Circuito eléctrico equivalente en resonancia de una celda piezoeléctrica de Van Dyke .....	49
Figura 12.	Circuito auxiliar para hallar la frecuencia de resonancia de la celda piezoeléctrico .....	49
Figura 13.	Circuito auxiliar para hallar la frecuencia anti resonancia de la celda piezoeléctrico .....	50
Figura 14.	Muestra el comportamiento típico de una celda piezoeléctrica, con valores : fr452KHz,fa470KHz;Ce=200Pf;Rm25 Ω.....	51
Figura 15.	Definición Eje acústico .....	52
Figura 16.	Representación del concepto de Índice de directividad .....	52
Figura 17.	Ejemplo de un Factor de Direccionalidad $ H(\theta,\phi) $ en el espacio tridimensional .....	55
Figura 18.	Ejemplos de planos horizontales y verticales del Factor de Direccionalidad de una celda piezoeléctrica .....	56
Figura 19.	Patrón de Radiación $bp(\theta)$ de un Pistón Acústico circular con especificaciones a=20cm, f=10KHz DI=18.46dB; ángulo de media potencia=22.13° .....	58
Figura 20.	Patrón de Radiación $bp(\theta)$ de una piezoeléctrica con especificaciones L=24cm, f=10KHz DI=5.1dB; ángulo de media potencia=31.62° .....	59
Figura 21.	Dependencia de la velocidad del sonido con la Temperatura y con la Salinidad .....	63
Figura 22.	Dependencia de la velocidad del sonido con la presión .....	63
Figura 23.	Se presentan las principales 4 capas, en las cuales se ha dividido el océano para el estudio del comportamiento de la velocidad del sonido. Sus profundidades dependen de las latitudes, horas del día y del clima	67
Figura 24.	Se presenta como es el perfil resultante de la velocidad del sonido con respecto a la variación de la temperatura y la presión .....	68
Figura 25.	Conceptos de rayo y frente de onda utilizados en la Teoría de Rayos ...	69

Figura 26.	Se muestra como la velocidad presentada en el perfil de velocidad del sonido se aproxima como constante, por capas por facilidad de la aplicación del Snell .....	70
Figura 27.	Para capas de agua donde la velocidad puede ser considerada como constante y que solo depende de la profundidad, la trayectoria que sigue el rayo sonoro es un arco de círculo .....	72
Figura 28.	Coeficiente de absorción con respecto a la frecuencia .....	75
Figura 29.	Pérdidas de transmisión TL(dB) para diferentes frecuencias y alcances en un sistema con frentes de onda esféricas .....	77
Figura 30.	a) Localización de la bahía de Cartagena b) Mapa Geológico de nor-occidente de Colombia .....	82
Figura 31.	Temperatura entre los meses diciembre a marzo (época de vientos) en la capa superficial.....	84
Figura 32.	Temperatura entre los meses abril a mayo (época de transición) en la capa superficial .....	85
Figura 33.	Temperatura entre los meses junio a agosto (época verano) en la capa superficial .....	85
Figura 34.	Temperatura entre los meses septiembre a noviembre (época de lluvias) en la capa superficial .....	86
Figura 35.	Comportamiento de la salinidad entre el diciembre marzo (época de vientos) en la capa superficial .....	87
Figura 36.	Comportamiento de la salinidad entre el abril y mayo (época de transición) en la capa superficial .....	87
Figura 37.	Comportamiento de la salinidad entre el junio agosto (época verano) en la capa superficial .....	88
Figura 38.	Comportamiento de la salinidad entre el septiembre a noviembre (época de lluvias) en la capa superficial .....	88
Figura 39.	Curvas de Temperatura, salinidad y velocidad del sonido promedios obtenida en investigación sobre las variables físicas de la Bahía de Cartagena en el año 2004 por el CIOH.....	89
Figura 40.	Diagramas de radiación horizontal y vertical del hidrófono RESON TC 4032 .....	94
Figura 41.	Sensibilidad del hidrófono RESON TC 4032.Su valor es de -170dB ref. 1V/ $\mu$ Pa a un metro de separación, en un ancho de banda amplio 5-100KHz .....	95
Figura 42.	Terminales de conexión del hidrófono RESON TC 4032 .....	95
Figura 43.	Montaje para determinar la característica TVR del Transductor Furuno a partir del valor RVR del hidrófono RESON TC 4032 .....	97
Figura 44.	Vista Frontal del montaje realizado para realizar calibración del transductor Furuno .....	100
Figura 45.	Vista superior del montaje realizado para realizar calibración del transductor Furuno, se observa que la distancia entre las celdas piezoeléctricas es de 0.37yd .....	100
Figura 46.	Representación de la característica TVR de Transductor Furuno .....	103
Figura 47.	Circuito auxiliar para hallar la frecuencia de resonancia de la celda piezoeléctrico .....	104
Figura 48.	A partir el montaje de del circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia fr, se encuentra que es de 57.5KHz, Rm=12.60 $\Omega$ .....	106

Figura 49.	Circuito auxiliar para hallar la frecuencia anti resonancia de la celda piezoeléctrico .....	107
Figura 50.	Circuito equivalente de Van Dyke, para el Transductor Furuno .....	108
Figura 51.	Comportamiento de la impedancia del transductor al variar la frecuencia.....	109
Figura 52.	La máxima transferencia de potencia en el transductor ocurre en la frecuencia de resonancia $f_r = 57.50\text{KHz}$ y con ancho de banda de $1920\text{Hz}$ . Tomando como referencia $1\text{V}$ .....	110
Figura 53.	Circuito equivalente del transductor conectado a una fuente de tensión, con el objeto de conseguir la máxima transferencia de potencia en el momento de trabajar en la frecuencia de resonancia.....	111
Figura 54.	Se presenta el diagrama de bloques de la simulación. ....	115
Figura 55.	Implementación de las funciones Entrada, tránsito y salida del canal mediante un código simulink de Matlab .....	122
Figura 56.	Se presenta el bloque que realiza el cálculo del ruido ambiental en el canal acústico submarino .....	124
Figura 57.	Bloques en simulink que integra el ruido ambiental y el índice de absorción .....	125
Figura 58.	Se presenta el bloque que representa el canal acústico submarino .....	126
Figura 59.	Diagrama que resumen el concepto de la modulación .....	127
Figura 60.	Se muestra el resultado de una señal modulada digitalmente en amplitud ASK.....	128
Figura 61.	Se presentan los esquemas de modulación y demodulación ASK, implementados en el programa Simulink para la prueba del canal acústico submarino .....	129
Figura 62.	Se muestra el resultado de una señal modulada digitalmente en frecuencia FSK .....	129
Figura 63.	Montaje previsto para la simulación del comportamiento del Canal Acústicos Submarino operando con un modulador FSK .....	130
Figura 64.	Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la frecuencia de operación. ....	133
Figura 65.	Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la distancia entre Tx y Rx.....	134
Figura 66.	Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la profundidad de ambos elementos piezoeléctricos .....	135
Figura 67.	Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación del tráfico marítimo en la bahía de Cartagena. ....	136
Figura 68.	Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la velocidad del viento en la bahía de Cartagena.....	137
Figura 69.	Se presenta el montaje final para la realización de la simulación del canal acústico submarino sometido a una modulación ASK y con medición de BER.....	138

Figura 70.	Comportamiento del modelo del canal acústico con respecto a la variación del tiempo de bit.....	140
Figura 71.	Se presenta el montaje final para la realización de la simulación del canal acústico submarino sometido a una modulación FSK y con medición de BER. ....	141
Figura 72.	Variación de la rata de errores de bit con respecto a la relación $E_o/N_o$ para diferentes valores de tiempo de bit $T_b$ . ....	143
Figura 73.	Variación de la rata de errores de bit BER con respecto a la relación a la distancia de separación entre transmisor y receptor, con una alimentación de 1V al transductor. ....	145
Figura 74.	Variación de la rata de errores de bit BER con respecto a la variación de la velocidad de los vientos, con una alimentación de 12V al transductor. ....	148

## Lista de Abreviaturas

$\alpha$	<i>Absorption coefficient, dB/yd.</i>	Coeficiente de absorción, dB/yd.
$\alpha$	<i>Attenuation factor, dB/Np.</i>	Factor de atenuación, dB/Np.
$\beta$	<i>Phase Factor, rad/m.</i>	Factor de Fase, rad/m.
B	<i>Modulus of compressibility.</i>	Módulo de compresibilidad.
BL	<i>Spectral Level and Band Level.</i>	Nivel espectral y Nivel de Banda.
Bp	<i>Radiation pattern.</i>	Patrón de radiación.
BW	<i>Bandwidth, Hz.</i>	Ancho de banda, Hz.
C	<i>Speed of sound, m/s.</i>	Velocidad del sonido, m/s.
CDT	<i>Equipment to obtain sound velocity profile and other parameters.</i>	Equipo para obtener perfil de velocidad del sonido y otros parámetros.
DI	<i>directivity index of the hydrophone located in the receiver.</i>	Es el índice de directividad del hidrófono ubicado en el receptor.
DT	<i>Detection threshold, dB</i>	Umbral de detección, Db.
E	<i>Sound energy density, julios/m<sup>3</sup>.</i>	Densidad de energía sonora, julios/m <sup>3</sup> .
F	<i>Frequency, Hz.</i>	Frecuencia, Hz.
G	<i>Velocity gradient.</i>	Gradiente de velocidad.
H	<i>Directionality factor.</i>	Factor de direccionalidad.
I	<i>Sound intensity, w/m<sup>2</sup>.</i>	Intensidad del sonido, w/m <sup>2</sup> .
$\lambda$	<i>Signal wavelength.</i>	Longitud de onda de la señal.
NI	<i>Intensity level, dB ref. 1<math>\mu</math>Pa.</i>	Nivel de intensidad, dB ref. 1 $\mu$ Pa.
NL	<i>Environmental noise considered isotropic.</i>	Es el ruido ambiental que se considera isotrópico.
N <sub>s</sub>	<i>Environmental noise due to marine traffic, dB ref. 1<math>\mu</math>Pa.</i>	Ruido ambiental debido al tráfico marino, dB ref. 1 $\mu$ Pa.

N <sub>t</sub>	<i>Environmental Noise Due to Turbulence, dB ref. 1μPa.</i>	Ruido ambiental debido a la Turbulencia, dB ref. 1μPa.
N <sub>th</sub>	<i>Thermal ambient noise, dB ref. 1μPa.</i>	Ruido ambiental térmico, dB ref. 1μPa.
N <sub>w</sub>	<i>Environmental noise due to the swell produced by the winds, dB ref. 1μPa.</i>	Ruido ambiental debido al oleaje producido por los vientos, dB ref. 1μPa.
P	<i>Acoustic pressure, nt/m<sup>2</sup></i>	Presión acústica, nt/m <sup>2</sup> .
ρ	<i>Fluid density, Kgm/m<sup>3</sup>.</i>	Densidad del fluido, Kgm/m <sup>3</sup> .
R	<i>Distance between transmitter / receiver in cylindrical coordinates in yards.</i>	Distancia entre transmisor/receptor en coordenadas cilíndricas en yardas.
R <sub>CR</sub>	<i>Current response as receiver A/μPa ref. 1μPa.</i>	Respuesta de corriente como receptor A/μPa ref. 1μPa.
R <sub>D</sub>	<i>Receptor threshold, known as the recognition differential.</i>	Corresponde al umbral del receptor, conocido como diferencial de reconocimiento.
R <sub>VR</sub>	<i>Voltage response as Receiver, V/μPa ref. 1μPa.</i>	Respuesta de voltaje como Receptor, V/μPa ref. 1μPa.
S	<i>Salinity, ppm.</i>	Salinidad, ppm.
S	<i>Maritime traffic.</i>	Tráfico marítimo.
S/N	<i>Signal to noise power ratio, dB.</i>	Relación potencia de la señal a la del ruido, dB.
SL	<i>It is the intensity level of the Transmitter, dB ref. 1μPa.</i>	Es el nivel de intensidad del Transmisor, dB ref. 1μPa.
SSP	<i>Sound velocity profile.</i>	Perfil de velocidad del sonido.
T	<i>Temperature.</i>	Temperatura.
TCR	<i>Current response as a transmitter, dB ref. 1μPa/A.</i>	Respuesta de corriente como transmisor, dB ref. 1μPa/A.
TL	<i>Pérdidas de Transmisión, dB ref. 1μPa.</i>	Pérdidas de Transmisión, dB ref. 1μPa.
TVR	<i>Voltage response as a transmitter, dB ref. 1μPa/V</i>	Respuesta de voltaje como transmisor, dB ref. 1μPa/V.

w	<i>Wind speed, m/s.</i>	Velocidad del viento, m/s.
Z	<i>Intrinsic impedance of the sound wave, RAYLS.</i>	Impedancia intrínseca de la onda sonora, RAYLS.

# Introducción.

## Formulación del problema.

### Planteamiento del problema.

Colombia está apostando por líneas de inversión en generación de capacidades para el desarrollo y construcción de la denominada Plataforma Estratégica de Superficie, PES (Cortes , 2012), como reto direccionado al año 2020, significando la construcción de los buques capitales que remplazarán las actuales fragatas de la Armada de la República de Colombia.

El concepto operacional de la Plataforma PES y su proyección a las misiones que se le requieran, se verán claramente reforzado por la utilización de las nuevas tecnologías de plataformas no tripuladas (UVs), entre ellos los vehículos aéreos, vehículos de superficie y los vehículos submarinos, los cuales servirán como sensores remotos para la Plataforma PES, que suministren información valiosa en las misiones de inteligencia, reconocimiento y vigilancia<sup>1</sup>.

Debido al incremento de nuevas capacidades y tareas encomendadas a todos estos UVs, se ha creado la necesidad de regular o estandarizar una multitud de aspectos necesarios para poder operarlos, varios de estos estándares tienen como objetivo fomentar la interoperabilidad UVs en un ambiente de servicio común/combinado.

La interoperabilidad aumenta la flexibilidad y eficiencia para cumplir los objetivos de la misión a través del intercambio de recursos y la utilización común de la información generada por los sistemas de UVs. El objetivo es permitir la interoperabilidad entre los segmentos de superficie, los segmentos de aire y los sub acuáticos con los segmentos Mando, Control, Comunicación, Computación e Inteligencia de los sistemas de UVs que operan en un ambiente común/combinado.

Colombia desde el año 2017 inicio la implementación de un sistema Data Link que permita transferir información táctica (voz, texto e imágenes) entre las unidades de una Fuerza de Tareas, con la finalidad de proporcionar un panorama táctico común que facilite la coordinación en tiempo real de las operaciones. El sistema permitiría la organización de varias redes, utilizando para ello las bandas HF, VHF, UHF y comunicaciones vía satélite en forma simultánea. Diversos equipos de comunicaciones podrían ser fácilmente integrados en redes, gracias a la flexibilidad del enlace de datos.

Este proyecto busca modelar y simular el fenómeno de propagación de las ondas sonoras en la capa superficial de la bahía de Cartagena, que permita integrar los diferentes sistemas de vigilancia y control de la Armada Nacional, redes de boyas, redes de vehículos submarinos autónomos, submarinos al escenario de interoperabilidad con el resto de sistemas autónomos de superficie, unidades a flote UAV, a través del proyecto Data link.

Con el diseño en implementación de este tipo de proyecto no sólo se busca desarrollar un modelo que asegure independencia tecnológica sino que además se obtiene un valor agregado, al desarrollarse de manera simultánea procesos disuasivos, al no ser de dominio público los alcances logrados en los sistemas diseñados e implementados.

Además de lo anterior se abre el campo de aplicación en el área de las comunicaciones inalámbricas tanto civiles como militares como son (Clemente Medina , 2013):

- Comunicaciones entre vehículos submarinos, redes de ROV y buzos (Pires , Colombo , Gallardo , & De Marziani, 2012).
- Posibles usos militares en la inspección y detección de minas en los muelles.
- Control de la navegación y tránsito naval tanto en puertos como en zonas costeras o alta mar (Bermúdez Arciniegas & Murcia Gallo , 2012).
- Desarrollo de proyectos relacionados con la acuicultura.
- Vigilancia y control de actividades comerciales como gaseoductos, oleoductos, cables de comunicaciones, plataformas de exploración de yacimientos petrolíferos.
- Obtención y registro de datos ambientales de mares y océanos como condiciones ambientales, temperatura, presión, salinidad, niveles de oxígeno en el agua, que son importantes a corto plazo para la predicción meteorológica a largo plazo en el seguimiento del cambio climático.
- Predicción de alteraciones naturales, con el objeto de prevenir desastres naturales.
- Observación y estudio de la vida submarina.

En consecuencia, contar con un modelo conceptual y contextualizado que explique de manera lo más acertada posible, la propagación de las ondas sonoras en la capa superficial de la bahía de Cartagena, y de variables que afectan dicha propagación permitirá a la Armada Nacional, avanzar en los siguientes campos:

- Permitirá evaluar las condiciones del canal de comunicación sub acústico en la bahía de Cartagena, con el objeto de permitir el establecimiento de redes de comunicación acústica para ser utilizado por: boyas, vehículos autónomos subacuáticos, submarinos y buzos.
- En el marco del proyecto del Data Link, vincular una herramienta software que permita estimar los alcances máximos y mínimos de predicción de blancos, de los diferentes sistemas de sonar a bordo de las diferentes unidades, tanto de superficie como submarinos o en boyas desatendidas, con el objeto de coordinar operaciones conjuntas vinculadas con las diferentes actividades de la Armada Nacional.
- Contar con una herramienta para la evaluación del desempeño de los sistemas sonar a ser adquiridos para los futuros proyectos vinculados al proyecto PES.

En este contexto, la pregunta que busca responder este trabajo de maestría es:

¿Se podrá modelar y simular el canal acústico submarino de la capa superficial de la bahía de Cartagena, que permita predecir el comportamiento del fenómeno de propagación de las ondas sonoras?

## Estado del Arte.

Uno de los medios más hostiles para las comunicaciones inalámbricas, es el medio acuático (Clemente Medina , 2013), no solo por su composición química sino por que obedece a condiciones del entorno, límites de la superficie del mar, presencia de las olas por un lado y por otro el fondo, su composición y la rugorocidad (Hernández Pérez, 2010).

A lo largo de esta exposición, se describen los principales fenómenos que afectan la propagación de las ondas sonoras en el mar, los cuales influyen de manera decisiva en las comunicaciones alámbricas en este medio, además se presentan los avances llevados a cabo con respecto al modelado de dicho canal acústico subacuático.

## 1. Factores que afectan la propagación.

De acuerdo con Urick (Urick, 1983), el sonido se propaga cuando en un fluido o medio elástico se generan ondas longitudinales de presión que se propaga a las partículas adyacentes. La onda del sonido es entonces una onda mecánica que dependerá de las propiedades mecánicas del medio, en especial de un inercia y elasticidad (Urick, 1983) (Angeles Madrigal & Flores Robledo , 2008).

En consecuencia, las ondas sonoras transportan energía mecánica, de una partícula a otra partícula, a una velocidad, que corresponde a la velocidad del sonido en dicho medio. Sin embargo parte de esta energía se absolver, siendo diversos los factores que propician este hecho, entre ellos pueden mencionarse<sup>8</sup>: pérdidas por transmisión (Pires , Colombo , Gallardo , & De Marziani, 2012), principalmente debido a la difusión geométrica y a la atenuación.

Las primeras debido a que la densidad de energía disminuye al alejarse de la fuente, dado que el área donde se distribuye es cada vez mayor, como aspecto interesante no depende de la frecuencia de transmisión<sup>8</sup>; las segundas, corresponden a la absorción de medio debido a la conversión de la energía acústica a calor; en este caso estas pérdidas dependen de manera directa de la variación de la frecuencia y de la distancia de separación a la fuente.

Agregando a lo anterior, también se presentan otros factores que afectan de manera significativa la propagación de las ondas sonoras, estos factores son los correspondientes al Ruido y a la Reverberación.

Con respecto al ruido, no se puede hablar de un único ruido, solo nos interesa aquellos que se prolongan en el tiempo, Ruido Permanente o de fondo (Hernández Pérez, 2010) (Angeles Madrigal & Flores Robledo , 2008), el cual se encuentra estratificado de acuerdo con Urick, en cinco regiones:

- Región I: De muy baja frecuencia de origen hidrostático como mareas y olas.
- Región II: Sus frecuencias se encuentran en el rango de 2 a 20Hz, y corresponden a las turbulencias oceánicas.
- Región III: Con frecuencias en el rango 20 a 500Hz, correspondientes al ruido producido por el tráfico marítimo distante, por lo cual no es constante, dado que dependen de la densidad media de dicho tráfico.
- Región IV: se encuentran en el rango 500 a 100KHz, correspondiente al ruido generado por la superficie del mar.
- Región V: También conocido como ruido térmico, y es el originado por el movimiento molecular de las partículas.

Por otro lado, la Reverberación corresponde a la sumatoria de diferentes tipos de agentes de dispersión. Estos a su vez provocan que el medio no sea continuo en sus propiedades físicas, lo cual provoca que parte de la energía interceptadas por ellos, sea retransmitida en otras direcciones. A manera de ejemplo se mencionan como agentes de dispersión: partículas de polvo, cardúmenes de peces, fluctuaciones del medio.

Otros factores que afectan la propagación, de las ondas (Ranz Guerra), son la propagación multiproyecto y la dispersión Doppler.

El primero siempre ocurre cuando entre el transmisor y receptor (Aparicio , García Nuñez, Jiménez Martín , & Álvarez, 2010), existen más de un camino posible para establecer la comunicación (Hernández Pérez, 2010), normalmente se dan a largas distancia y en aguas poco profundas.

Por su parte el efecto Doppler, es debido a que la señal acústica, está sujeta a las variaciones de la frecuencia; la frecuencia con que es emitida una señal, no es la misma con la que es recibida en el receptor. Esto debida a los movimientos relativos, tanto del emisor como el receptor o por la superficie del mar.

Como consecuencia de todo lo anterior, las variaciones espaciales de la velocidad del sonido son evidentes, que provocan uno de los más importantes fenómenos físicos que afectan la propagación de las ondas sonoras en el mar, la Refracción.

Cabe señalar, que la velocidad del sonido en el mar, varía con la temperatura, la salinidad y la profundidad considerada (Urick, 1983). El medio marino es un medio no homogéneo, por lo cual se observa que la velocidad disminuye hasta cierta profundidad y en adelante la nuevamente se incrementa a medida que aumenta la profundidad.

Dada su importancia en el cálculo de la velocidad, para estas variables, se elaboran perfiles de velocidad del sonido (Guerra), con respecto a la profundidad. Estos perfiles dependerán de la ubicación geográfica del sitio considerado, de la estación del año y sin lugar a duda de las condiciones meteorológicas.

Por otro lado, con respecto a la temperatura, se utilizan equipos conocidos como batitermógrafos (García Martínez, 2018) , para establecer de manera experimental las curvas del perfil de la temperatura en función de la profundidad.

Tomando en consideración estas dos variables (temperatura y profundidad), se encuentra que la velocidad de la onda sonora en el mar, aumenta al incrementarse la temperatura y de igual forma con el aumento de profundidad. Sin embargo, el agua que se encuentra en la superficie del mar se calienta, y al aumentar la profundidad en el lecho marino el agua es más fría; en consecuencia, la temperatura y la profundidad son dos aspectos que se oponen a medida que se profundiza en el mar.

Estos perfiles suelen dividirse en cuatro capas principales (Veloso Alarcón , 2007).

**Capa superficial:** (Ranz Guerra), Es una capa isoterma, debido a que las aguas se encuentran permanentemente en un proceso de mezcla ocasionado por la presencia de los vientos en la superficie del mar. En este caso el sonido tiende a ser atrapado en una especie de guía de onda, por las reflexiones en la superficie del mar y la refracción hacia arriba.

**Capa Termoclina estacional:** es una capa donde la temperatura decrece con la profundidad; depende de las estaciones. En verano, la termoclina es fuerte y puede ser identificada de manera sencilla. Sin embargo, en invierno, se convierte en débil y prácticamente se fusiona con la capa superficial.

**Capa Termoclina principal:** Es una zona que no se ve afectada por los cambios de estación. En esta capa, ocurre el aumento principal de temperatura. Aunque la velocidad aumenta con la profundidad, el efecto de la temperatura lo supera, haciendo que la velocidad disminuya.

**Capa Isoterma profunda:** Presenta temperaturas cercanas a los 4 grados centígrados (Velo Alarcón , 2007), y el efecto de la presión prima sobre las bajas temperaturas, por lo cual se da un incremento de la velocidad del sonido en la medida que se desciende al lecho marino.

## **2. Modelo de propagación de la onda sonora en el medio subacuático.**

Encontrar un modelo matemático de la onda de la propagación de las ondas acústicas en un medio subacuático, se refiere a la elaboración de los algoritmos y programas en un software especializado, que permita obtener las ecuaciones de onda de manera lo más aproximado posible para la propagación de la onda de sonido en el mar.

La diversidad de los modelos desarrollados, se fundamentan en la necesidad de cubrir un amplio rango de frecuencia, los diferentes tipos de fondos marinos, y los tipos de medios marinos (Velo Alarcón , 2007).

La caracterización del modelo de propagación es de suma importancia, para todos los procesos de investigación que se plantean en la actualidad, sin embargo aún en este momento no se ha llegado a un consenso sobre cual modelo es el más conveniente, para cada una de las aplicaciones (Clemente Medina , 2013).

Existen un sin número de modelos de aproximaciones para la solución de las ecuaciones de onda, tales como: el Método por Elementos Finitos (Hernández Pérez, 2010), el Método de Imágenes, la Transformada Hankel, el Método de Rayo (Urlick, 1983), (Cortes , 2012) (Urlick, 1983), (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009), (Cortes , 2012) y el Método de Modos Normales (Angeles Madrigal & Flores Robledo , 2008), (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009), entre otros.

De los nombrados, los más ampliamente conocidos son los tres últimos, dado los resultados entregados y por el número de variables que se manejan en su ejecución los modelos tradicionales también conocidos como determinísticos por involucrar, el conocimiento exacto de la física y de la dinámica del medio, ello ha conducido a diferentes modelos, en función a las aproximaciones realizadas: Teoría de rayos (Urlick, 1983), (Cortes , 2012), Teoría de los modos normales (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009), integración espectral; conocidos también como modelos geométricos, dado que requieren para su aplicación un conocimiento preciso del entorno (Clemente Medina , 2013).

Para el caso, de las comunicaciones inalámbricas, estos modelos no proporcionan un mecanismo eficaz para la representación del medio, dado que no incluyen el conocimiento estadístico del canal de comunicaciones.

Lo anterior, ha contribuido a la aparición de modelos mixtos, centrados en la teoría de rayos, a las que se les ha añadido la dinámica del medio y distribuciones estadísticas, propicio para el canal acústico subacuático.

En la literatura también se encuentran otros métodos que se basan en la solución de la ecuación de onda del medio, y el conociendo de las condiciones del entorno, entre estos, se encuentra el método de las diferencias finitas, el cual es un procedimiento que involucra cálculos mediante métodos numéricos (Veloso Alarcón , 2007).

## **Aportes investigativos.**

En consecuencia, contar con un modelo conceptual y contextualizado que explique de manera lo más acertada posible, la propagación de las ondas sonoras en la capa superficial de la bahía de Cartagena, y de variables que afectan dicha propagación permitirá a la Armada Nacional, avanzar en los siguientes campos:

Permitirá evaluar las condiciones del canal de comunicación sub acústico en la bahía de Cartagena, con el objeto de permitir el establecimiento de redes de comunicación acústica para ser utilizado por: boyas, vehículos autónomos subacuáticos, submarinos y buzos.

En el marco del proyecto del Data Link, vincular una herramienta software que permita estimar los alcances máximos y mínimos de predicción de blancos, de los diferentes sistemas de sonar a bordo de las diferentes unidades, tanto de superficie como submarinos o en boyas desatendidas, con el objeto de coordinar

operaciones conjuntas vinculadas con las diferentes actividades de la Armada Nacional.

Contar con una herramienta para la evaluación del desempeño de los sistemas sonar a ser adquiridos para los futuros proyectos vinculados al proyecto PES.

## **Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Realizar un modelo conceptual y simular mediante software, el fenómeno de propagación de las ondas sonoras a través de la capa superficial de la bahía interna de la ciudad de Cartagena.

### **Objetivos específicos.**

Establecer las variables que intervienen en la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino y de manera específica en la capa superficial de la ciudad de Cartagena.

Elaborar el modelo conceptual para la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino tomando en consideración el estado del arte de los diferentes mecanismos utilizados para su representación y modelación.

Simular el modelo conceptual de propagación de las ondas sonoras en la capa superficial de la bahía interna de la ciudad de Cartagena.

## **Organización del Trabajo de Grado**

El documento se encuentra organizado por capítulos que apuntan a dar cumplimiento a los diferentes objetivos específicos planteados en el proyecto.

### **Cumplimiento del objetivo específico uno**

*Establecer las variables que intervienen en la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino y de manera específica en la capa superficial de la ciudad de Cartagena*

Para el cumplimiento de este objetivo es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Búsqueda, conceptualización y recopilación de bibliografía pertinentes a la definición y elaboración de un modelo analítico del canal de comunicaciones acústico submarino aplicable a la capa superficial de la bahía de Cartagena.
- Definición de las variables y de las ecuaciones analíticas que permitan modelar de manera conceptual dicho canal de comunicaciones.
- Caracterización de la bahía de Cartagena, tomando en consideración los parámetros que intervienen en la modelación de la propagación de las ondas sonora, como son las variaciones de temperatura y salinidad con respecto a la profundidad.

En este orden de ideas se elaboran los capítulos 1 y 2:

### Capítulo 1. Fundamentos de enlaces acústicos submarinos.

En este capítulo realizando una analogía entre los sistemas de sonar pasivo y el de comunicaciones, punto a punto simplex (transmisión en una sola dirección) (Tomasi, 2003), acústico submarino, utilizando la ecuación del sonar, se describen cada uno de sus componentes, proporcionando las ecuaciones analíticas o curvas mediante las cuales pueden realizarse el balance de potencia del sistema de comunicaciones acústicas submarinas.

Agregando a lo anterior se realiza un resumen de los fenómenos físicos que afectan la propagación del sonido en el agua salada y una descripción de las diferentes capas en las cuales se divide el perfil de la velocidad del sonido en mar, incluyendo la capa superficial.

Finalmente, este capítulo permite establecer las variables que intervienen en la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino.

### Capítulo 2. Descripción de la Bahía de Cartagena.

Se presenta una descripción de la Bahía de Cartagena, haciendo énfasis en el comportamiento de las variables pertinentes para realizar el computo de la velocidad de sonido en la capa superficial, como son la temperatura y la salinidad.

Además, se estudia el comportamiento del viento sobre la Bahía de Cartagena, en los diferentes períodos del año, esta información será requerida para realizar el cálculo del ruido debido al oleaje, dado que es el parámetro necesario para realizarlo.

## **Cumplimiento del objetivo específico dos.**

*Modelo conceptual para la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino tomando en consideración el estado del arte de los diferentes mecanismos utilizados para su representación y modelación.*

Para el cumplimiento de este objetivo es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Realizar estudio de los elementos que permiten entrar (Transductores) y salir (hidrófonos) al canal, asegurando la máxima transferencia de potencia al canal acústico submarino.
- Definir las ecuaciones analíticas que permita la simulación de la propagación de las ondas acústica submarina en el canal acústico submarino.
- Elaboración de un modelo analítico del canal acústico submarino que tenga en consideración las pérdidas por propagación o divergencia geométrica y las pérdidas por absorción.

En este orden de ideas se elaboran los capítulos 3:

### Capítulo 3. Parámetros de Transductores e Hidrófonos

En este capítulo se presenta una introducción sobre los elementos que permiten entrar y salir al canal acústico submarino cumpliendo con compromiso de entregar la máxima potencia al canal; reemplazan las antenas en un sistema de comunicaciones RF.

Se presentan los parámetros de los elementos piezoeléctricos funcionando como transductor (Transmisor) y como hidrófono (receptor), evidenciando las ecuaciones analíticas que permiten convertir una onda de voltaje en una onda de presión y viceversa.

Por otro lado, en el tránsito de la onda de presión en el canal acústico submarino, estas son afectadas las pérdidas por propagación o divergencia geométrica y las pérdidas por absorción.

## **Cumplimiento del Objetivo específico tres.**

*Simulación del modelo conceptual de propagación de las ondas sonoras en la capa superficial de la bahía interna de la ciudad de Cartagena*

Para el cumplimiento de este objetivo es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Elaborar un diagrama de bloques que evidencie el sistema de comunicaciones acústico submarino que se desea simular.
- Representar cada uno del bloque del sistema mediante ecuaciones analíticas.

- Realizar la programación del sistema de comunicaciones acústica submarina.
- Definir los escenarios considerado para la simulación.
- Simular los diferentes escenarios y evaluarlos.

En este orden de ideas se elaboran los capítulos 4:

Capítulo 4. Simulación del fenómeno de propagación de las ondas sonora en la capa superficial en la bahía interna de la ciudad de Cartagena.

En este capítulo se presenta el diagrama de bloque del sistema de comunicaciones acústicas submarinas que será implementado mediante el programa Simulink de Matlab, mediante las ecuaciones analíticas estudiadas en los tres primeros capítulos.

Además se definirán escenarios de simulación y se evaluarán sus resultados mediante del parámetro BER.

# Capítulo 1: Fundamentos de enlaces acústicos submarinos.

Todo sistema de telecomunicación debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal/ruido (S/N) mínima que garantice su correcto funcionamiento.

De esta hipótesis, no se escapan los sistemas de comunicación basados en la propagación de ondas sonoras bajo el agua del mar; sistemas como el sonar, boyas desatendidas, sistemas de comunicaciones y otros, deben cumplir con requisitos de diseño e implementación que aseguren un mínimo valor de la relación S/N que permitan establecer el correcto enlace entre el transmisor y el receptor.

Es por ello que resulta imperativo adelantar un estudio de los principales parámetros, que intervienen en el cálculo del balance energético de un enlace acústico submarino; como punto de partida se propone la Ecuación de transmisión (Hernandez Reyes, 2015), que se presenta en la ecuación 1:

$$SL - TL - (NL - DI) = RD \quad (1)$$

Donde:

SL: Es el nivel de intensidad (densidad de potencia) del Transmisor en dB ref. 1μPa a 1 yarda.

TL: Son las pérdidas de transmisión en el trayecto entre transmisor y receptor en dB.

NL: Es el ruido ambiental que se considera isotrópico en un ancho de banda de 1Hz en dB.

DI: Es el índice de directividad del hidrófono ubicado en el receptor en dB.

RD: Corresponde al umbral del receptor (S/N); conocido como Diferencial de Reconocimiento en dB.

A continuación, se presentará el estudio de cada uno de estos parámetros, con el objetivo de lograr la conceptualización de los principales parámetros involucrados en el diseño de este tipo de sistemas de comunicaciones.

## 1.1. Ondas Acústicas.

Las ondas acústicas son una forma de propagación de energía, por medio de ondas longitudinales en un medio elástico, es decir las partículas del medio se mueven en la dirección en la que se propaga la onda sonora.

Los sistemas que permiten transformar las ondas sonoras a ondas mecánicas y viceversa con conocidos como:

- Elementos Activos o Transductor que son materiales piezoeléctricos encargados de transformar las señales eléctricas en vibraciones mecánicas; ubicados en el transmisor.
- Elementos Pasivos o hidrófonos, los cuales tiene la misión de convertir las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica; ubicados en el receptor.

Para el caso del transductor, al ser excitado por una señal eléctrica, la superficie que entra en contacto con el agua, oscilará hacia adelante creando zonas de compresión (líneas continuas), y cuando dicha superficie se mueve hacia atrás, creará zonas de expansión (líneas discontinuas) (Salva Pando , 1994), ver figura 1.

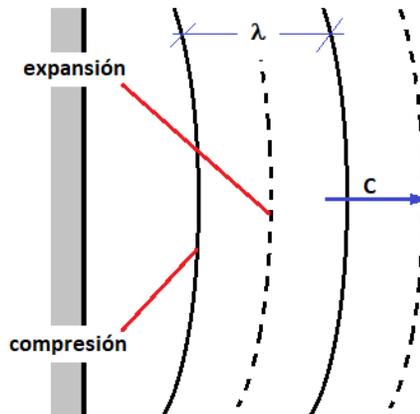


Figura 1. Concepto de las zonas de compresión y expansión generadas por los transductores en las fronteras de sus caras de contacto con el agua marina  
Fuente: Propia

Debido a que este movimiento de compresión y expansión es alternado, esta perturbación se transmite al agua, propagándose como una onda longitudinal con una velocidad  $C$ ; la distancia de separación entre dos compresiones o expansiones consecutivas corresponde a una longitud de onda  $\lambda$  de la señal que se propaga. Por otro lado, la frecuencia con que se propaga la onda en el medio, es la misma frecuencia con que se alimenta el transductor.

## 1.2. Presión Acústica.

La presión acústica se define como la fuerza que se ejerce sobre un área determinada, por lo cual sus unidades serán:

$$Presión = \frac{Fuerza}{Unidad\ de\ Area} = \frac{Newton}{m^2} = Pascal = Pa$$

(2)

$$Presión = \frac{Fuerza}{Unidad\ de\ Area} = \frac{dinas}{cm^2}$$

Vale la pena señalar que las unidades prácticas utilizada en acústica submarina son:

$$micro\ Pascal = 1\mu Pa = 10^{-6}Pa$$

$$micro\ Bar = 1dina/cm^2 \quad (3)$$

Por lo cual se puede concluir la siguiente equivalencia para futuros cálculos en el proyecto:

$$1\mu Pa = 10^{-5} \frac{dinas}{cm^2} = 10^{-5}\mu Bar \quad (4)$$

La oscilación del transductor es un movimiento armónico simple, por lo cual se podría suponer sin temor a equivocarse que la presión acústica también presenta el mismo comportamiento de onda cosenoidal; los principales parámetros son presentados en la Figura 2.

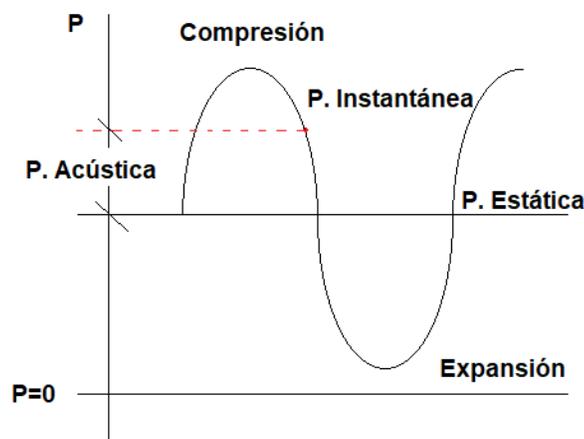


Figura 2. Principales parámetros de la onda de Presión Acústica  
Fuente: Propia

En la figura 2, pueden realizarse las siguientes observaciones:

- Existen zonas de máxima presión, las cuales corresponde a la compresión.
- Igualmente existen zonas de mínima presión acústica, que corresponden a la expansión.
- La presión estática, es el valor de la presión en un punto del mar, cuando no existe señal en el transductor, es decir cuando no hay onda sonora; este valor

corresponde al peso de la columna del agua en el mar. Se puede obtener cuantitativamente la Presión Acústica mediante la ecuación 5:

$$P. Acústica = P. instantánea - P. estática \quad (5)$$

Tratándose de una onda cosenoidal es conveniente trabajar con valores eficaces o rms (Salva Pando , 1994), por lo cual:

$$P_{rms} = \frac{P_{máx}}{\sqrt{2}} [W] \quad (6)$$

### 1.3. Intensidad Acústica.

La intensidad Acústica se define como la cantidad de energía acústica que atraviesa una unidad de área en la unidad de tiempo, es decir corresponde a un valor de densidad de potencia:

$$I [watt/m^2] = \frac{Potencia}{Area} \left[ \frac{joule}{s} \cdot \frac{1}{m^2} \right] \quad (7)$$

Es conveniente, expresar el valor de la intensidad en función de la presión acústica, para lo cual se recurre a la siguiente igualdad (Salva Pando , 1994):

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho C} [W/m^2] \quad (8)$$

Donde:

$P_{rms}$ : Es el valor eficaz de la presión Acústica en w.

$\rho$ : Corresponde al valor de la densidad del medio, donde se propaga la onda  $kg/m^3$ .

$C$ : Es la velocidad del sonido en el medio m/s.

El producto de la densidad del medio y la velocidad de la onda sonora, se conoce como *impedancia acústica específica* y su unidad es el Rayls (Urick, 1983).

$$Z [rayls] = \rho C \quad (9)$$

Para el agua de mar a 20°C, se conocen los siguientes datos (Urick, 1983):

$$\rho = 1.026 \text{ Kg/m}^3$$

$$C = 1.500 \text{ m/s}$$

$$Z = 1.54 \times 10^6 \text{ Rayls}$$

## 1.4. Nivel de Intensidad Sonora.

Como es sabido el oído humano responde a las perturbaciones sonoras, de manera logarítmica; por otro lado, dado que el ancho de banda de las intensidades sonoras puede alcanzar un ancho de banda grande, es necesario para su estudio del uso de escalas logarítmicas, para lo cual se procede de la siguiente manera:

Dado que:

$$I = \frac{\text{Potencia}}{\text{Area}} \left[ \text{w}/\text{m}^2 \right]$$

Despejando la potencia y expresándola en decibeles, tomando como referencia  $P_0$ , se obtiene el Nivel de Potencia Sonora (Urick, 1983):

$$L(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\text{Potencia Medida}}{\text{Potencia de referencia}} \quad (10)$$

$$L(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\text{Intensidad Medida} \times \text{Area}}{\text{Intensidad referencia} \times \text{Area}}$$

$$L(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (11)$$

Sin embargo, como se ha indicado arriba, es conveniente expresarla en función de la presión acústica, para lo cual se procede:

$$L(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}^2}{P_o^2} \right)$$

$$L(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{P_o} \right) \quad (12)$$

Si se observa el desarrollo de las expresiones desde la ecuación 10 a la 12, se puede concluir, que el Nivel de Potencia, el Nivel de Intensidad y el Nivel de Presión Acústica son iguales (Salva Pando , 1994), es decir:

$$L(dB) = 10 \log_{10} \frac{\text{Potencia Medida}}{\text{Potencia de referencia}} = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_o} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}}{P_o} \right)$$

Donde  $P_o$  es la presión de referencia, en acústica submarina este valor es:

$$P_o = 1 \mu Pa = 10^{-5} \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$$

Sin embargo, antes de los años de 1970, se utilizaba como referencia:

$$1 \mu Bar = 1 \text{ dina/cm}^2$$

Por esta razón, en acústica submarina, es normal presentar los valores de nivel de intensidad dejando evidencia de la referencia de manera explícita (Salva Pando , 1994); a manera de ejemplo:

$$185 \text{ db; rel } 1 \mu Pa$$

Se puede hallar una expresión para realizar la transformación entre los valores de referencias el Nivel de Presión Sonora (SPL), tal como se observa en la ecuación 13:

$$SPL \text{ ref } 1 \mu Pa = SPL \text{ ref } 1 \mu Bar + 100 \text{ dB} \quad (13)$$

Ya con estos conocimientos básicos, se puede definir el primero de los términos de la ecuación (1), es decir el Nivel de la Fuente.

## 1.5. Nivel de la Fuente (Source Level SL).

El nivel de la fuente SL, se define como el nivel de presión sonora SPL, medido en un punto ubicado a una (1) yarda de distancia desde el transductor (Salva Pando , 1994).

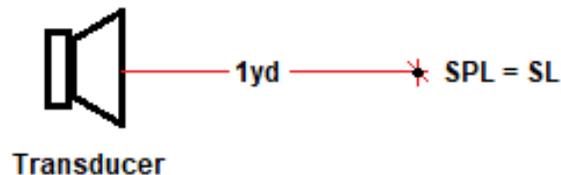


Figura 3. Definición del Nivel de Fuente, es el valor del SPL a una distancia de 1Yd, medido a partir del transductor  
Fuente: Propia

Este valor debe ser específico con respecto al nivel de presión utilizado como referencia y a la distancia en la cual fue realizada la medida; a manera de ejemplo:

$$SL = 210dB; \text{ ref } 1\mu Pa, \text{ a } 1Yd$$

$$SL = 110 \text{ dB}; \text{ ref } 1\mu Bar, \text{ a } 1Yd$$

Pero si la medida, se realiza a un metro de distancia y no a 1 Yd, se realiza la conversión mediante la ecuación 14 (Salva Pando , 1994):

$$SL \text{ ref } 1m = SL \text{ ref } 1Yd - 0.78dB \quad (14)$$

### 1.5.1. Relación Señal a Ruido.

La relación de la Señal a Ruido se define como la relación entre la intensidad de la Señal entre la Intensidad del Ruido, ambos presentes en el mismo punto de medición, se define como:

$$\left( \frac{\text{Intensidad de la Señal}}{\text{Intensidad del Ruido}} \right)_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{S}{N} \right) \quad (15)$$

### 1.5.2. Rango dinámico.

El rango dinámico se define como la medida de la intensidad acústica de la señal en un punto, en ausencia de la intensidad del ruido (Salva Pando , 1994).

Para lograr establecer la relación S/N, la intensidad acústica del ruido también debe ser medida en ausencia de la señal en dicho punto.

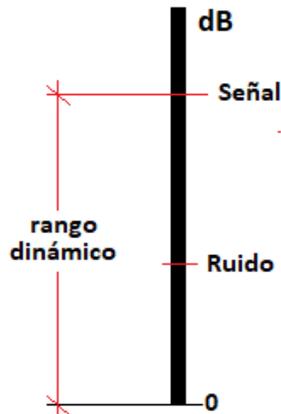


Figura 4. Definición del rango dinámico  
Fuente: Propia

### 1.5.3. Nivel espectral y Nivel de Banda (BL).

El Nivel Espectral se refiere al nivel de potencia de sonido en un ancho de banda de 1 Hz, mientras el Nivel de Banda se refiere a un ancho de banda  $W$ . La relación analítica entre ellos es la siguiente:

Si se tiene un espectro de frecuencia plano, como por ejemplo el ruido blanco A.W.G., la intensidad total en todo el ancho de banda será (Salva Pando , 1994):

$$I_B = IW$$

Si se divide en ambos lados de la igualdad por la intensidad de referencia  $I_o$ , se obtiene:

$$\frac{I_B}{I_o} = \frac{I}{I_o} W$$

Expresando en unidades de decibel:

$$10 \log_{10} \left( \frac{I_B}{I_o} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_o} W \right)$$

Por lo tanto, se concluye:

$$BL = SPL + 10\log_{10}(W)$$

O también:

$$SPL = BL - 10\log_{10}(W) \quad (16)$$

La ecuación 16, representa el valor del nivel de potencia de sonido en un ancho de banda de 1 Hz (Urlick, 1983).

## 1.6. Ruido en acústica submarina.

En acústica submarina, de manera general se pueden distinguir tres tipos de ruidos (Waite, 2002) (Salva Pando, 1994):

- **Ruido Ambiental:** Es el ruido que siempre está presente en el océano, es conocido como el "*Ruido de Fondo*", del cual no se puede identificar una fuente individual, para los cálculos es considerados isotrópico.
- **Ruido Radiado:** Es todo ruido emitido por fuentes caracterizables individualmente y de los cuales son conocidas valor de SPL; ejemplos de estos tipos de ruidos son los buques, submarinos, torpedos y otros.
- **Ruido propio:** Es el ruido generado por la plataforma o embarcación sobre el cual está montado el sistema de comunicación; el ruido ingresa por el hidrófono del receptor.

Para el presente estudio, se tomará en consideración únicamente el ruido de fondo o ambiental, lejos del tráfico de pesado de embarcaciones y submarinos, considerando que el sistema de comunicaciones se encuentra instalado sobre una plataforma que no genera ruido propio; por lo cual será el ruido ambiental será único que será conceptualizado.

### 1.6.1. Ruido Ambiental (NL).

Es el ruido de fondo, que no pueden ser caracterizables, pueden deberse a fenómenos naturales como son los sismos en el fondo del océano, agitación de la superficie del mar por los fuertes vientos, ruidos generados por los animales como delfines, ballenas, cangrejos, cardumen y otros (Redondo & Mateo Ruiz, 2017).

Continuando con la idea, otros ruidos ambientales son de origen artificial, producto de la actividad del humano, por ejemplo, del tráfico marítimo generado por embarcaciones distantes, que por su lejanía no permiten ser identificados ni caracterizado.

El nivel del Ruido Ambiental (NL) se mide en dB ref.  $1\mu\text{Pa}$  (o  $1\mu\text{Bar}$ ) y un ancho de banda de 1Hz, es considerado un ruido isotrópico (Kuperman & Roux, 2016) (es decir que tiene la misma intensidad en todas las direcciones).

La cantidad de ruido que ingresa al hidrófono del receptor está limitada por el valor del Índice de Directividad del hidrófono (DI), por lo tanto, puede ser calculado mediante la expresión presentada en la ecuación 17.

$$NL = NL_{\text{isotrópico}} - DI \quad (17)$$

El nivel de ruido ambiental NL, se mide inicialmente en el ancho de banda W (BL), y posteriormente se transforma a niveles espectrales de anchos de banda de 1Hz, de acuerdo con la ecuación 16.

$$SPL = BL - \log_{10}(W)$$

Se acostumbra a dividir el espectro de ruido ambiental en 3 bandas.

1. **Banda baja:** Desde 1Hz hasta varios cientos de Hz; los espectros dominantes son el tráfico marino (ruido de fondo), el cual presenta un pico en 30Hz y a partir de este valor desciende rápidamente sobre los 100Hz (Salva Pando , 1994).

Los ruidos de microsismos y las fluctuaciones de presiones relacionadas con los mismos, aunque intensas, por estar por debajo de los 10Hz, pierden interés en las comunicaciones Acústicas Submarinas Navales (Salva Pando , 1994).

En este orden de ideas, los fenómenos que generan ruido ambiental en esta banda y sus expresiones empíricas conocidas (Sánchez Matias, 2013) son las siguientes:

**Turbulencia:** Es decir el movimiento del mar de manera aleatoria, donde las partículas forman remolinos no periódicos; la figura 5, muestra su comportamiento de este ruido con respecto a la frecuencia, de igual manera la ecuación 18 (Kuperman & Roux, 2016), muestra cómo realizar el cálculo analítico:

$$N_t(f)_{dB} = 17 - 30\log_{10}f; \text{ref } 1\mu\text{Pa}, 1\text{Hz} \quad (18)$$

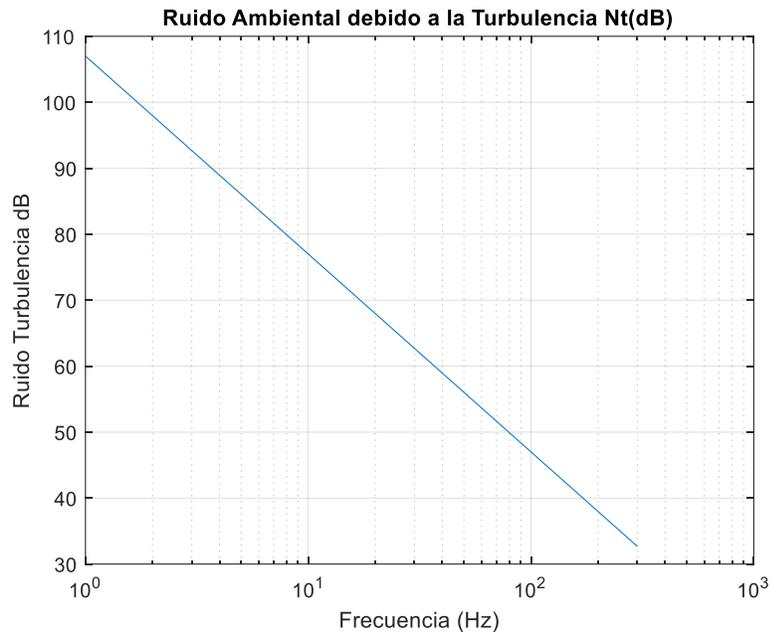


Figura 5. Muestra el ruido ambiental debido a las Turbulencias en dB rel 1μPa  
Fuente: Propia

**Tráfico marítimo:** Es el ruido producido por las hélices, por la maquinaria de propulsión, los sonares y las sondas de profundidad (Redondo & Mateo Ruiz , 2017). La mayor parte del ruido son de frecuencias bajas, inferiores a 1 kHz, que coincide con las frecuencias utilizadas en comunicaciones acústicas. La expresión para su cálculo se muestra en la ecuación 19 (Kuperman & Roux, 2016).

$$N_s(f)_{dB} = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log_{10}f - 60\log_{10}(f + 0.03); \text{ref } 1\mu Pa \text{ } 1Hz \quad (19)$$

Donde **s** es el factor de tráfico marítimo, y pueden ser consideradas tres escalas a saber:  $s=0$  corresponde a tráfico bajo,  $s=0.5$  es tráfico medio y  $s=1$  es un tráfico intenso, respectivamente. La figura 6, muestra el comportamiento este fenómeno para las escalas comentadas

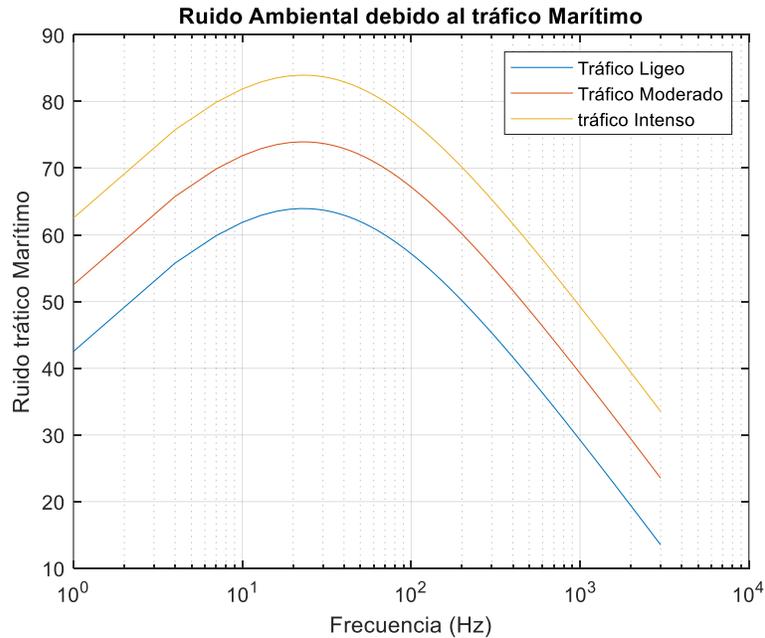


Figura 6. Se presenta el Ruido ambiental debido a tráfico Marítimo para el caso de tráfico ligero, moderado e intenso. Las unidades son dB rel 1μPa  
Fuente: Propia

2. **Banda media:** Se presenta desde varios cientos de Hz hasta 50KHz; en este caso, el espectro es dominado por los vientos presentes y que actúan sobre la superficie del mar. El ruido por oleaje se incrementa 5dB cuando se duplica la velocidad del viento. Igualmente se manejan expresiones empíricas para su cálculo, la ecuación 20 (Borda Garcia & Mendoza Valero , 2019), muestra cómo puede realizarse el cálculo de este ruido:

$$N_w(f)_{dB} = 50 + 7.5w^{\frac{1}{2}} + 20\log_{10}f - 40\log_{10}(f + 0.4); ref 1\mu Pa 1Hz \quad (20)$$

El ruido producido por el viento se modela con el parámetro  $w$ , que corresponde a la velocidad del viento sobre la superficie del mar, expresada en m/s, aunque es normal encontrarla en Nudos, donde  $1 Nudo = 0.514m/s$ . La figura 7, muestra el comportamiento de este tipo de ruido con respecto a la variación de la frecuencia.

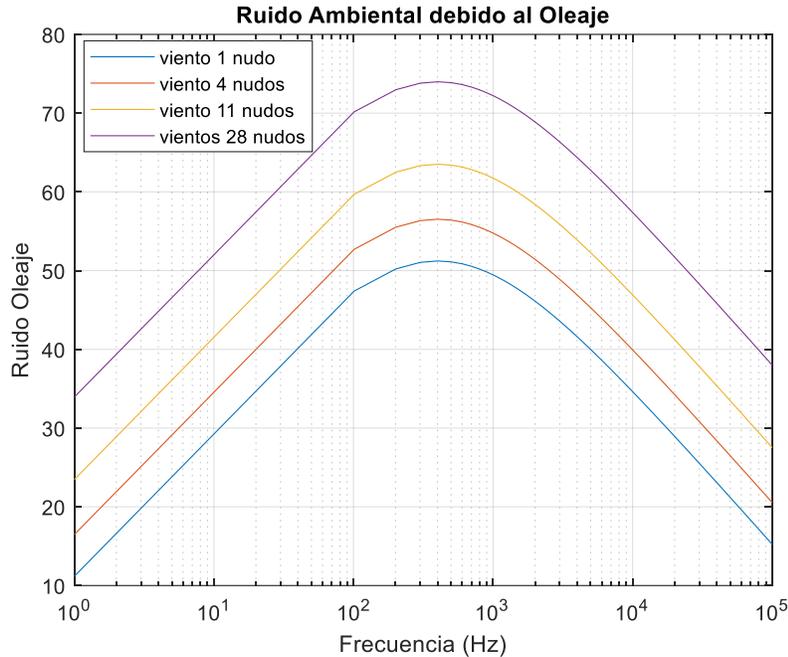


Figura 7. Se presenta el Ruido ambiental debido al Oleaje para el caso de vientos de 1,4,11 y 28 nudos  
Las unidades son dB rel 1µPa  
Fuente: Propia

De acuerdo con Salva Pando (Salva Pando , 1994), en acústica submarina este cálculo es el más importante, e indica que cuando se realizan en aguas poco profundas, debido a las olas que rompen sobre las playas, hacen que el ruido no coincida con los valores presentados por las curvas generadas por la ecuación 20, por lo cual es mejor recurrir a sus medición directa.

3. **Banda Alta:** para valores de frecuencias superiores a 50KHz; en este caso cuando se trabaja en altas frecuencias, el ruido predominante es el ruido térmico, debido a la agitación térmica de las moléculas del agua; la expresión empírica conocida es (Borda Garcia & Mendoza Valero , 2019):

$$N_{th}(f)_{dB} = -15 + 20\log_{10}f; ref 1\mu Pa 1Hz \quad (21)$$

En la figura 8, se puede apreciar la variación del ruido debido a la agitación térmica con respecto a la frecuencia.

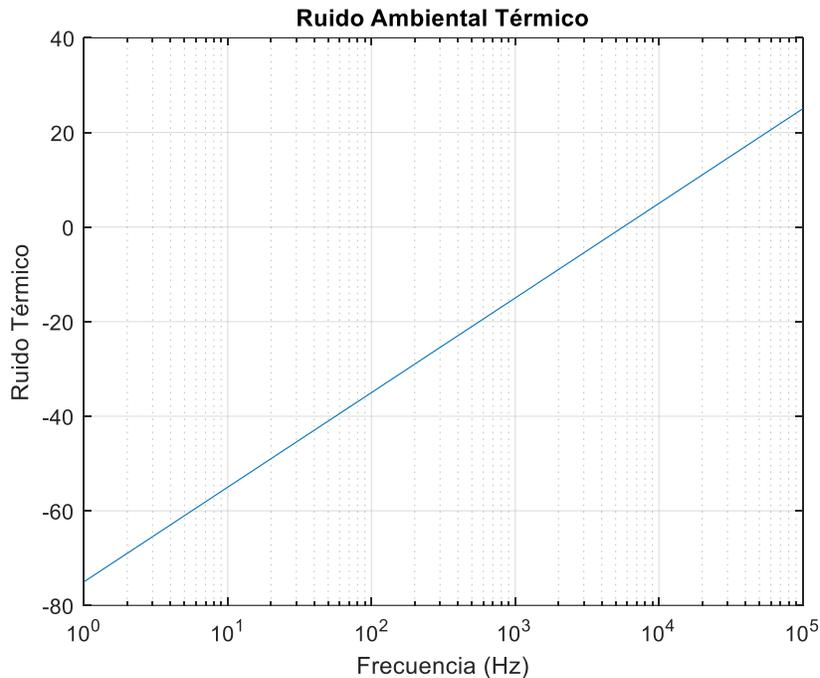


Figura 8. Se presenta el Ruido ambiental térmico.  
Las unidades son dB rel 1μPa.  
Fuente: Propia

El ruido ambiental total se calcula entonces como la contribución de todos estos subcomponentes (Borda Garcia & Mendoza Valero , 2019):

$$N(f)_{dB} = N_t(f)_{dB} + N_s(f)_{dB} + N_w(f)_{dB} + N_{th}(f)_{dB} \quad (22)$$

Estos valores de ruido están expresados con dB ref. 1μPa, y ancho de banda de 1Hz; por otro lado, la frecuencia debe ingresar a las expresiones en KHz.

## 1.7. Transductores e Hidrófonos.

Como ya se había indicado, los transductor son los dispositivos que transforman la señal eléctrica en energía mecánica o acústica en este caso especial; por otro lado, los hidrófonos son los elementos utilizados para recuperar la señal del medio acuáticos, dado que tienen la capacidad de convertir las ondas de presión acústica SLP en señales eléctricas (Leyton Vásquez & Roa Becerra, 2017).

Cabe señalar, que, para poder comprender esta característica de estos dispositivos, es importante mencionar las propiedades piezoeléctricas, que poseen algunos materiales, consistentes en que inducen una carga eléctrica cuando son sometidos a

un esfuerzo mecánicos (efecto generador), o lo inverso, cuando se le aplica un campo eléctrico, como consecuencia de alimentar el dispositivo con una diferencia de potencia, se producirá un esfuerzo mecánico en su estructura (efecto motor) (González, Cesari, & Vicioli ).

El estudio detallado de estos materiales se escapa del objetivo de este documento, pero se puede señalar que por ejemplo sobre la existencia de ciertos materiales cristalinos que se encuentran en la naturaleza en su forma natural y que poseen esta propiedad piezoeléctrica: El cuarzo y la Turmalina (Salva Pando , 1994). Igualmente los existe artificiales, como la Sal de Rochelle, Fosfato Deshidrogenado de Amonio y el sulfato de Litio.

### 1.7.1. Características Operativas de los Transductor y los Hidrófonos.

Como se ha indicado en el párrafo anterior estos dispositivos tienen la propiedad de transformar energía eléctrica a energía acústica y viceversa; para realizar la contextualización de los mismos se plantea la definición de una serie de parámetros que permitirán aproximarse a la elaboración del modelo analítico de estos equipos. Estos parámetros son los siguientes:

#### 1.7.1.1. Respuesta de voltaje a circuito abierto (VCA - RVR).

Este parámetro es conocido también como Sensibilidad del hidrófono o Respuesta de Voltaje como Receptor RVR; para la realización de su medición, se le instala un voltímetro de corriente alterna en los terminales del hidrófono y estando este último sumergido bajo agua, se le hace incidir sobre su cara una onda acústica plana de magnitud  $1\mu\text{Pa rms}$ ; expresando el voltaje inducido en terminales en decibele tomando como referencia  $V_{ref} = 1\text{v}/\mu\text{Pa}$ . La ecuación 24, muestra la expresión analítica para el cálculo de dicho parámetro (Salva Pando , 1994):

$$RVR = 20\log_{10} \frac{V}{1V/\mu\text{Pa}}, ref 1V/\mu\text{Pa} \quad (24)$$

#### 1.7.1.2. Respuesta de voltaje como transmisor (TVR).

Para la realización de su medición se procede como se indica a continuación: Se sumerge el transductor bajo el agua y se alimenta con una fuente de tensión alterna, con un valor de  $1\text{Vrms}$ ; a una distancia de una yarda, medido sobre el eje acústico y desde la superficie activa del transductor se obtiene el valor de la presión; expresando este valor de presión acústica, tomando como referencia  $1\mu\text{Pa}/\text{v}$ , se obtiene el valor del parámetro TVR. La ecuación 25, muestra el cálculo del mismo (Salva Pando , 1994):

$$TVR = 20\log_{10} \frac{P}{1\mu\text{Pa}/\text{v}}; ref 1\mu\text{Pa} /V a 1\text{yd} \quad (25)$$

Se debe recordar que, si la medición se realiza a un metro de distancia, a la ecuación 25 se le debe restar 0.78dB.

### 1.7.1.3. Respuesta de corriente como transmisor (TCR).

Este parámetro es el valor de la presión acústica medida a una distancia de 1 yarda desde la superficie activa del transductor y sobre el eje acuático, cuando es alimentado de forma que circula 1Arms por el dispositivo; este valor se expresa en decibeles, tomando como referencia 1μPa/A. La ecuación 26 muestra la forma de realizar el cálculo de dicho parámetro (Salva Pando , 1994):

$$TCR = 20\log_{10} \frac{P_{rms}}{1\mu Pa/A}, ref 1\mu Pa /A a 1yd \quad (26)$$

Si la medición se realiza a un metro de distancia, a la ecuación 26 se le debe restar 0.78dB.

### 1.7.1.4. Respuesta de corriente como Receptor (RCR).

Corresponde al valor de la corriente que se induce en el hidrófono, cuando sobre su superficie activa, incide una onda acústica plana de 1μPa; este valor se expresa en decibeles tomando como referencia 1Arms/μPa. La ecuación 27 presenta la expresión analítica para realizar dicho calculo (Salva Pando , 1994):

$$RCR = 20\log_{10} \frac{I}{1A/\mu Pa}, ref 1A/1\mu Pa \quad (27)$$

## 1.7.2. Relación entre las características operativas.

Las celdas piezoeléctricas son dispositivos que pueden ser considerados lineales y recíprocos, es decir se comportan como transductor o como hidrófono con la misma eficiencia, por lo cual es posible encontrar expresiones analíticas que permitan la conversión entre sus diferentes parámetros operativos.

### 1.7.2.1. Relación entre la respuesta a circuito abierto y la respuesta de corriente como receptor.

La relación entre estos dos parámetros, representados esquemáticamente en la Figura 9; se puede demostrar que este dado por la ecuación 28 (Salva Pando , 1994):

$$RVR = RCR + 20\log_{10}|Z_h| ref 1\mu Pa/V \quad (28)$$

Donde:

Z<sub>h</sub>: Es la impedancia del Hidrófono a la frecuencia de trabajo.

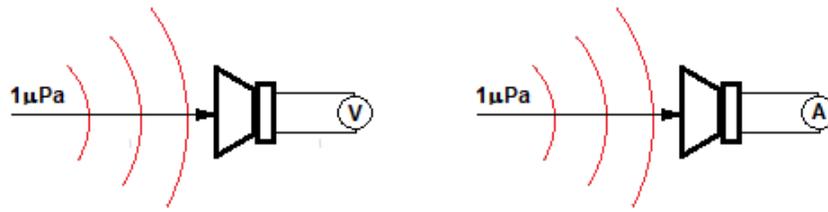


Figura 9. Se presentan la equivalencia entre los parámetros operativos RVR y RCR  
Fuente: Propia

### 1.7.2.2. Relación entre la Respuesta de Voltaje como transmisor y la respuesta de corriente como transmisor.

La relación entre estos dos parámetros, representados esquemáticamente en la figura 10. Se puede demostrar que este dado por la ecuación 29 (Salva Pando , 1994):

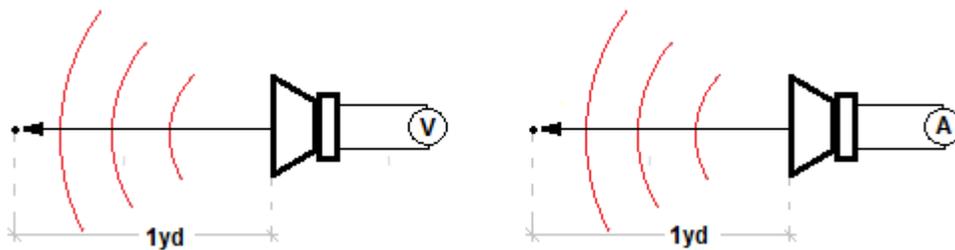


Figura 10. Se presentan la equivalencia entre los parámetros operativos TVR y TCR  
Fuente: Propia

$$TVR + 20 \log_{10} |Z_t| = TCR \quad (29)$$

### 1.7.3. Caracterización de la Celda Piezoeléctrica.

Para el caso en que se cuente con un elemento piezoeléctrico, llámese transductor o hidrófono, y no se tengan las características del mismo, además de las características operativas, antes descritas, es importante establecer los valores de frecuencia de resonancia  $f_r$ , donde el valor de su impedancia toma su mínimo valor y la frecuencia anti resonancia  $f_a$  en donde adquiere su máximo valor de impedancia. Estos valores permitirán realizar una mejor selección de la frecuencia de operación en cada uno del caso como transmisor o receptor de la señal.

Un procedimiento ampliamente discutido en la literatura sobre estudios de celdas piezoeléctricas es el modelo de Van Dyke (Leyton Vásquez & Roa Becerra, 2017), el cual consiste en un circuito eléctrico equivalente en resonancia tal como es presentado en la Figura 11.

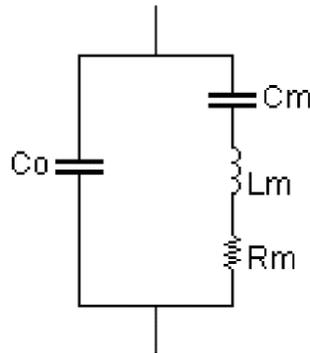


Figura 11. Circuito eléctrico equivalente en resonancia de una celda piezoeléctrica de Van Dyke  
Fuente: Leyton, V.; Roa, B. (2017). Representación matemática y técnicas de caracterización para celdas piezoeléctricas, una revisión bibliográfica.

Ahora bien, para encontrar los valores de cada uno de estos componentes  $C_o$ ,  $C_m$ ,  $L_m$  y  $R_m$ , se propone el montaje de dos circuitos, los cuales se describen a continuación:

### 1.7.3.1. Circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia $f_r$ .

Consistente en la conexión de un circuito serie: Generador de señales, resistencia  $R_1$  y la celda piezoeléctrica, tal como es presentado en la Figura 12 (Borda Garcia & Mendoza Valero, 2019). Para el análisis del circuito se realiza la medida de valores de tensión RMS, a la salida del generador de señales y sobre la celda en estudio.

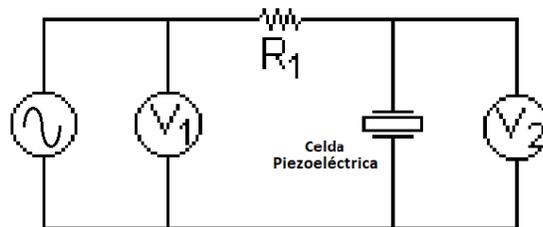


Figura 12. Circuito auxiliar para hallar la frecuencia de resonancia de la celda piezoeléctrico  
Fuente: Propia

Al hacer variar la frecuencia del generador de señales, se encontrará un valor en el cual se genera una tensión mínima  $V_2$ , sobre la celda piezoeléctrica; ese valor de frecuencia es la frecuencia de resonancia  $f_r$  y el valor de la impedancia de la celda, será netamente resistivo, representada en el circuito de Van Dyke por la resistencia  $R_m$ . Su cálculo puede realizarse mediante de la ecuación 30, obtenida al despejar  $R_m$ , luego de aplicar un divisor de tensión sobre la celda:

$$V_2 = V_1 \frac{R_m}{R_1 + R_m}$$

$$R_m = R_1 \frac{V_2}{V_1 - V_2} \quad (30)$$

### 1.7.3.2. Circuito para el cálculo de la frecuencia de anti resonancia $f_a$ .

Para este caso, nuevamente se realiza el montaje de los tres elementos en serie: Generador de señales, celda piezoeléctrica y una resistencia R2. Tal como puede apreciarse en la figura 13 (Leyton Vásquez & Roa Becerra, 2017). Para el análisis del circuito se realiza la medida de valores de tensión RMS, a la salida del generador de señales y sobre la resistencia R2.

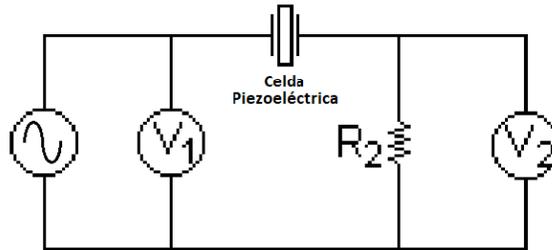


Figura 13. Circuito auxiliar para hallar la frecuencia anti resonancia de la celda piezoeléctrico  
Fuente: Propia

Dado que la frecuencia de resonancia  $f_a$  es aquella donde la celda adquiere el máximo valor de impedancia, al ir variando la frecuencia del generador de señales, se encontrará un valor de  $V_2$ , que será el mínimo de todos los valores medidos, como consecuencia se tendrá un máximo valor de tensión sobre la celda piezoeléctrica. En ese momento la frecuencia del generador de señales, será la frecuencia anti resonante  $f_a$ .

Es necesario medir el valor de la capacitancia de la celda piezoeléctrica para lo cual se utiliza una frecuencia inferior a la de resonancia, con el objetivo que los valores de  $R_m$  y la reactancia inductiva debido a  $L_m$ , sean despreciables. Dado que  $C_m$  y  $C_o$  quedaría en paralelo se cumpliría:

$$C_e = C_o + C_m \quad (31)$$

El resto de los valores se obtendrían a partir de las siguientes ecuaciones de 32 a 35 (Leyton Vásquez & Roa Becerra, 2017):

$$\frac{C_o}{C_m} = \frac{f_r^2}{f_a^2 - f_r^2} \quad (32)$$

$$L_m = \frac{1}{\omega_r^2 C_m} \quad (33)$$

$$C_m = \frac{C_e}{1 + \frac{C_1}{C_m}} \quad (34)$$

$$Q_m = \frac{1}{\omega_r \cdot C_m \cdot R_m} \quad (35)$$

La figura 14, muestra el comportamiento típico de una celda piezoeléctrica, con valores:  $f_r=452\text{KHz}$ ,  $f_a=470\text{KHz}$ ;  $C_e=200\text{Pf}$ ;  $R_m= 25 \Omega$ ;

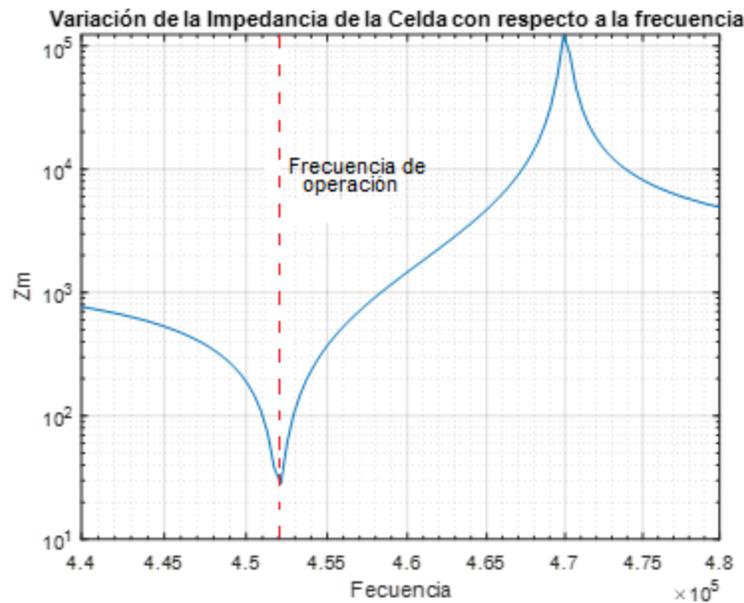


Figura 14. Muestra el comportamiento típico de una celda piezoeléctrica  
Con valores:  $f_r=452\text{KHz}$ ,  $f_a=470\text{KHz}$ ;  $C_e=200\text{Pf}$ ;  $R_m= 25\Omega$   
Fuente: Propia

## 1.8. Índice de Directividad (DI).

El índice de directividad como su nombre lo indica, corresponde a la capacidad que tiene la celda piezoeléctrica de concentrar el sonido emitido o recibido en un sector del espacio; esta característica depende de la forma geométrica de la celda y de la frecuencia del sonido (Waite, 2002).

La expresión analítica que permite su cálculo es la siguiente:

$$DI(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{ax}(R)}{I_s(R)} \right] \quad (36)$$

Donde:

$I_{ax}(R)$ : Es la intensidad sonora de la celda piezoeléctrica en el eje acústico a una distancia  $R$ .

$I_s(R)$ : Es la intensidad sonora de una fuente sonora omnidireccional, a la misma distancia  $R$ , y utilizando la misma potencia acústica

Para hacer claridad en esta definición, se indica que el eje acústico es el lugar geométrico donde la Intensidad acústica emitida, en el caso de transductor o recibida, en el caso de hidrófonos, tiene su valor máximo; la generalidad es que la intensidad acústica se distribuya de manera simétrica en torno a este eje, por lo cual para su descripción se utilizan coordenadas esféricas, ver figura 15.

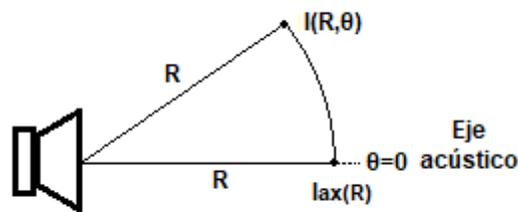


Figura 15. Definición Eje acústico  
Fuente: Propia

Dicho en palabras simples, el índice de Directividad  $DI$ , es la relación en dB entre las intensidades de una celda piezoeléctrica real y una omnidireccional tal como es representado en la figura 16. Para que esta relación tenga sentido ambas celdas deben emitir o recibir la misma potencia acústica y debe ser medida la intensidad a la misma distancia  $R$ .

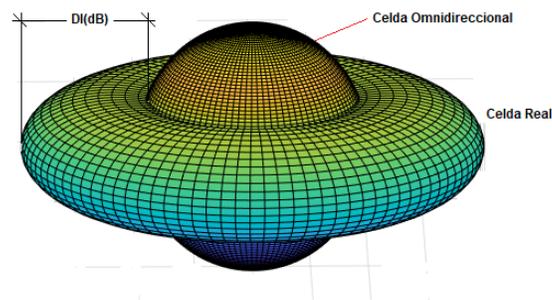


Figura 16. Representación del concepto de Índice de directividad  
Fuente: Propia

En consecuencia, se puede concluir:

- Como puede observarse en la figura 16, si el índice de directividad DI, se calcula a una distancia fija R, será variable con las coordenadas theta y phi del sistema de coordenadas esférico, es decir  $DI(\theta, \phi)$ .
- Como existirán puntos del espacio donde la intensidad acústica de la celda real, será inferior a la intensidad de la celda omnidireccional, DI tendrá valores negativos.
- En los puntos del espacio donde ambas intensidades tengan el mismo valor, el índice directivo será igual a cero  $DI = 0dB$ .
- $DI(\theta, \phi)$  tendrá un valor máximo en la dirección donde la intensidad sea máxima, es decir en la dirección de  $I_{ax}(R)$ ; este valor y dicha dirección es el que entrega el fabricante de la celda como un valor único de ella, es decir  $DI(dB) = DI_{máx}(dB)$ .

Por otro lado, esta expresión puede expresarse en función de la presión acústica (Salva Pando , 1994), para lo cual:

$$DI(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_{ax}^2(R) / \rho C}{P_s^2(R) / \rho C} \right] = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_{ax}^2(R)}{P_s^2(R)} \right]$$

$$DI(dB) = 20 \log_{10} \left[ \frac{P_{ax}(R)}{P_s(R)} \right] \quad (37)$$

Donde:

$P_{ax}(R)$ : Es la Presión acústica de la celda piezoeléctrica en el eje acústico a una distancia R

$P_s(R)$ : Es la Presión acústica emitida por una fuente sonora omnidireccional, a la misma distancia R, y utilizando la misma potencia acústica.

Dada la estructura de esta expresión, es claro observar que el Índice de Directividad DI, no depende de la presión acústica de referencia.

### 1.8.1. Factor de Direccionalidad H( $\theta$ ).

Revisando las conclusiones del Ítem anterior, queda una pregunta en el ambiente; si el fabricante sólo entrega valor del índice de directividad en la dirección en que es máximo, ¿Cómo se hace para calcular el valor de la directividad en otras direcciones?, para responder esa pregunta se recurre al cálculo del Factor de Direccionalidad H.

En este orden de ideas, si se eligen puntos en el “campo lejano”, donde se cumpla que R sea mucho mayor que las dimensiones de la celda piezoeléctrica; se define el Factor de Direccionalidad (Salva Pando , 1994) como:

$$|H(\theta)| = \frac{P(R,\theta)}{P_{ax}(R)} \quad (38)$$

Donde:

$P(R, \theta)$ : Es la Presión acústica en cualquier punto del plano vertical a una distancia R, contante y por lo general con  $\phi = 0 \text{ rad}$

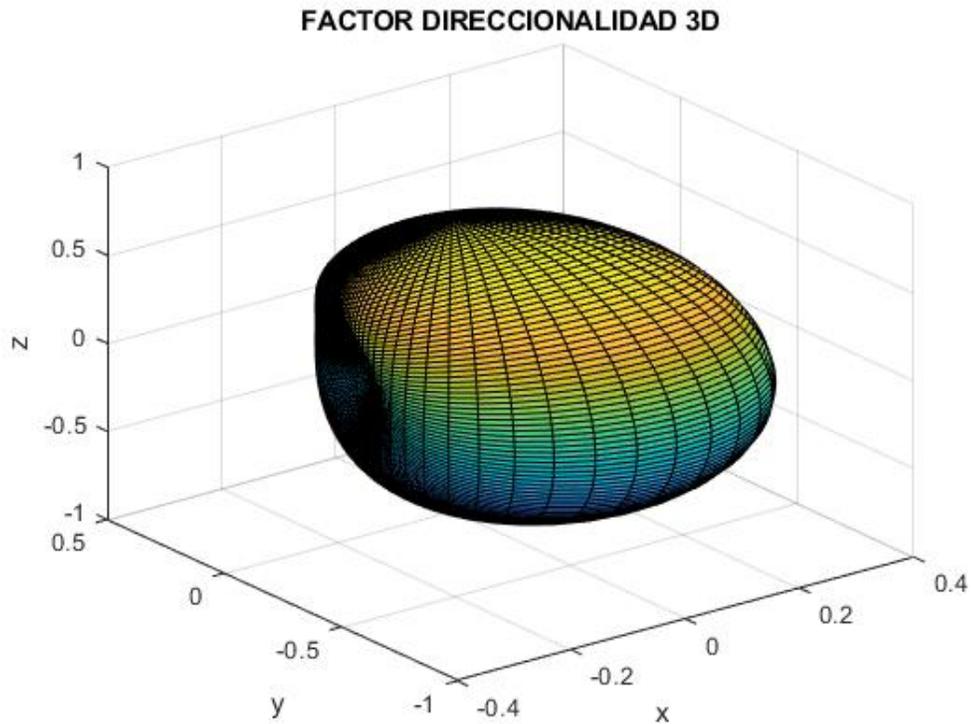
$P_{ax}(R)$ : Es la Presión acústica de la celda piezoeléctrica en el eje acústico a una distancia R

A partir de esta ecuación, se pueden encontrar entonces, la presión en cualquier punto del espacio bidimensional:

$$P(R, \theta) = P_{ax}(R)|H(\theta)| \quad (39)$$

El valor de  $|H(\theta)|$ , depende de la geometría del transductor o hidrófono de la frecuencia y su magnitud está normalizada, es decir  $|H(\theta)| \leq 1$

Por otro lado, para cubrir todos los puntos del espacio tridimensional, el índice de radiación se trabaja en coordenadas esféricas, donde la celda piezoeléctrica se instala en el centro del sistema de coordenadas y se realiza el cálculo de H, a una distancia fija R, y tomando en consideración la variación de las otras coordenadas es decir  $|H(\theta, \phi)|$ , ver figura 16.



*Figura 17. Ejemplo de un Factor de Direccionalidad  $|H(\theta, \phi)|$  en el espacio tridimensional  
Fuente: Propia*

Por practicidad en la parte operativa se entregan dos cortes de la transversales y mutuamente perpendiculares entre sí (Ver figura 18):

- **Plano Horizontal:** Se permite variar  $0 < \phi < 2\pi \text{ rad}$  para un valor fijo  $\theta = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ , en cuyo caso se tiene  $H(\phi)$ .
- **Plano Vertical:** Se permite la variación de  $0 < \theta < 2\pi \text{ rad}$ , con un ángulo fijo de  $\phi = 0 \text{ rad}$ , en este caso se tiene  $H(\theta)$ .

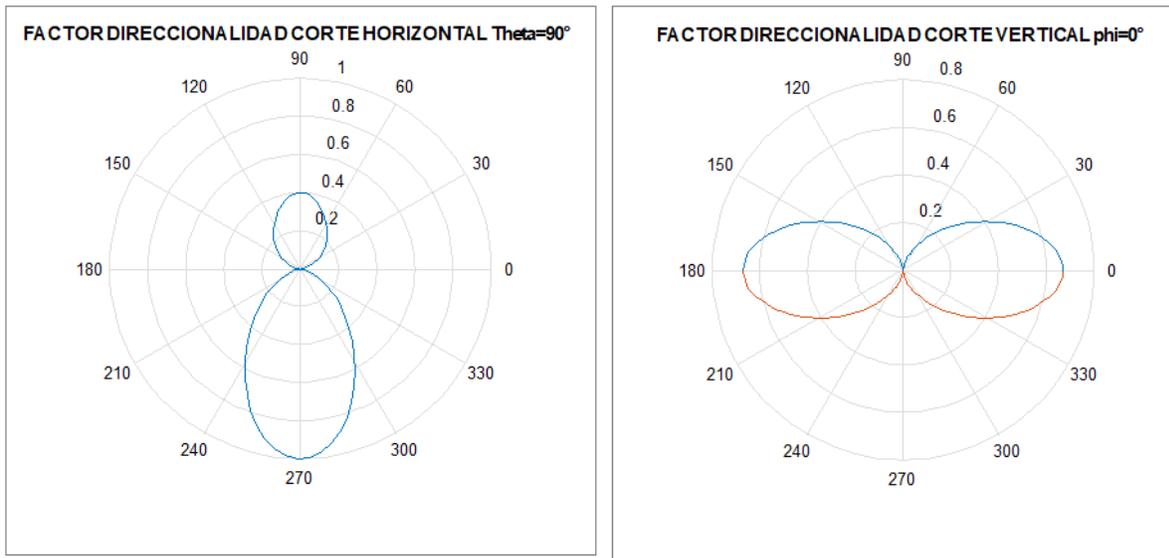


Figura 18. Ejemplos de planos horizontales y verticales del factor de direccionalidad de una celda piezoeléctrica. Fuente propia.

### 1.8.2. Patrón de Radiación $bp(\theta)$ .

También conocido como Patrón de haces  $bp$  (beam pattern), se obtiene a partir de la ecuación que relaciona el Factor de Direccionalidad con la presión acústica (Urlick, 1983) (Salva Pando, 1994), es decir:

$$P(R, \theta) = P_{ax}(R)|H(\theta)|$$

Aplicando el concepto de Intensidad a ambos lados de la igualdad:

$$I(R, \theta) = \frac{P^2(R, \theta)}{\rho C} = \frac{P_{ax}^2(R)}{\rho C} |H(\theta)|^2$$

$$I(R, \theta) = I_{ax}(R)|H(\theta)|^2$$

Despejando  $|H(\theta)|^2$ :

$$|H(\theta)|^2 = \frac{I(R, \theta)}{I_{ax}(R)}$$

Llevando esta expresión a decibeles se obtiene el Patrón de radiación, es decir:

$$bp(\theta) = 10 \log_{10} |H(\theta)|^2 = 10 \log_{10} \frac{I(R, \theta)}{I_{ax}(R)} \quad (40)$$

Como observaciones de esta expresión se pueden concluir:

- Dado que por definición  $I_{ax}(R) > I(R, \theta)$ , se cumplirá que patrón de radiación siempre es negativo.
- Dado que es una relación entre intensidades, no existe dependencia con respecto a los valores de presión de referencia.
- En el caso de tratarse de un transductor o un hidrófono omnidireccional, el patrón de radiación será cero dB.
- No se debe olvidar que, en realidad, se trata de un patrón tridimensional y por comodidad se presentan dos cortes: uno vertical y otro horizontal.

Finalmente se pueda dar respuesta al interrogante planteado: ¿Cómo se hace para calcular el valor de la directividad en otras direcciones? Para lo cual se procede de la siguiente manera:

$$DI(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{ax}(R)}{I_s(R)} \right]$$

Pero ya se demostró que:

$$I(R, \theta) = I_{ax}(R) |H(\theta)|^2$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$DI(R, \theta) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{ax}(R) |H(\theta)|^2}{I_s(R)} \right]$$

$$DI(R, \theta) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{ax}(R)}{I_s(R)} \right] + 10 \log_{10} |H(\theta)|^2$$

Reemplazando sus expresiones equivamente:

$$DI(R, \theta) = DI(R) + bp(\theta) \quad (41)$$

A continuación, se presentan cálculo de la directividad para las celdas piezoeléctricas, que revisten un grado de importancia para el proyecto, como es el pistón acústico circular y la fuente lineal simple, dado que el transductor utilizado es un pistón acústico circular marca Furuno, mientras el hidrófono es una fuente lineal simple marca RESON referencia TC 4032

### 1.8.3. Pistón Acústico Circular.

Los transduces e hidrófonos usados en submarinos y buques son de esta forma. Si se supone que el pistón tiene un radio “a” en metros; se tiene que el Factor de direccionalidad, está dado por la expresión, de acuerdo con Kinsler. L; Frey. A; Copenr. A; Sanders. J (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander , 2000):

$$H(\theta) = \frac{2J_1(Kasen\theta)}{Kasen\theta} \quad (42)$$

Donde:

J1: Es la Función de Bessel de primera clase y orden 1

a: Radio del Pistón

K: Número de onda,  $K = 2\pi f / C$

El índice de Directividad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$DI(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{2\pi}{c} af \right] \quad (43)$$

Donde:

f: Frecuencia de la onda sonora en Hz.

C: Velocidad del sonido en m/s.

a: Radio del pistón en m.

El ángulo de media potencia o de -3dB, se calcula mediante:

$$2\alpha_{-3dB} = 59 \frac{c}{2af} \quad (44)$$

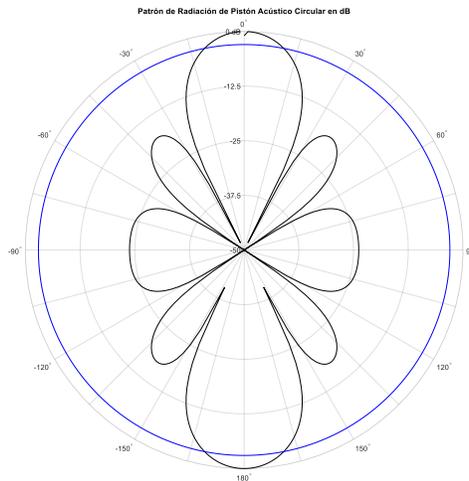


Figura 19. Patrón de Radiación  $bp(\theta)$  de un Pistón Acústico circular con especificaciones  $a=20\text{cm}$ ,  $f=10\text{KHz}$   
 $DI=18.46\text{dB}$ ; ángulo de media potencia= $22.13^\circ$

Fuente: Propia.

### 1.8.4. Fuente Lineal simple.

Este modelo sencillo se utiliza en sonares pasivos de baja frecuencia y de largo alcance. Para este caso, se tiene los siguientes parámetros de acuerdo con Kinsler. L; Frey. A; Copenr. A; Sanders. J (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander , 2000):

Factor de direccionalidad:

$$H(\theta) = \left| \frac{\text{sen}(1/2KL\text{sen}\theta)}{(\frac{1}{2})KL\text{sen}\theta} \right| \text{ con } K = \frac{2\pi f}{c} \quad (45)$$

El índice de Directividad DI:

$$DI(dB) = 10\log_{10} \left( \frac{2Lf}{c} \right) \quad (46)$$

Angulo de media potencia:

$$2\alpha_{(-3dB)} = 50.6 \frac{c}{Lf} \quad (47)$$

Donde:

L: Es la longitud de la fuente lineal simple en m.

f: Frecuencia en Hz.

C: Velocidad del Sonido m/s.

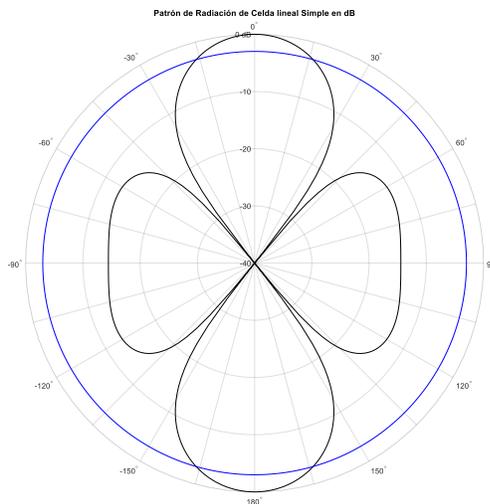


Figura 20. Patrón de Radiación  $bp(\theta)$  de una piezoeléctrica con especificaciones  $L=24\text{cm}$ ,  $f=10\text{KHz}$   $DI=5.1\text{dB}$ ; ángulo de media potencia= $31.62^\circ$

Fuente: Propia

### 1.8.5. Relación entre el nivel de la Fuente SL, Potencia acústica e Índice de Directividad DI.

Utilizando las definiciones de SL y DI se pueden encontrar la relación entre estos valores (Urick, 1983) (Salva Pando , 1994):

$$SL = 171.5 + 10\log_{10}Pot + DI + E \quad (48)$$

Donde:

SL: Nivel de la Fuente dB rel 1 $\mu$ Pa a 1 yd.

Pot: Potencia Acústica en vatios.

DI: Índice de Directividad en dB.

E: Es la eficiencia del transductor que puede estar entre 20% y 70%

Algunas observaciones importantes para el uso de esta expresión:

- Si la fuente es omnidireccional DI=0; Si la fuente es de 1w,  $10\log_{10}(1) = 0$ , en ese caso el nivel de la Fuente es de 171.5 dB rel 1 $\mu$ Pa a 1 yd.
- Si se desea referir esta expresión a 1m; a la ecuación 48 se le debe restar 0.787dB.
- Si se desea referir SL a 1 $\mu$ Bar y a una distancia de una yarda, a la ecuación 48 se le debe restar 100dB.

## 1.9. Propagación del Sonido en el Océano.

Los avances más significativos en el estudio de la propagación del sonido, se han dado por la necesidad de realizar la localización seguimiento y clasificación de submarinos (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander , 2000), al involucrarse con este problema, ha sido requerido desarrollar medios eficientes de convertir la potencia eléctrica en potencia acústica, sistemas para la detección de señales muy débiles en presencia del ruido de fondo, tráfico de embarcaciones y otros.

Por otro lado, se ha abordado el estudio de los fenómenos, que afectan la propagación del sonido en el agua salada, como son la absorción, la reflexión en la superficie y en el fondo del océano, refracción, dispersión, difracción y otros.

En ese apartado se hará un resumen de estos fenómenos que deben ser tomados en consideración, al momento de diseñar un sistema de comunicaciones acústica submarina; esto permitirá familiarizarnos con los parámetros del canal, adquiriendo el conocimiento necesario para su posterior simulación.

### 1.9.1. Velocidad del sonido en el mar.

Las ondas sonoras pueden viajar a través de cualquier material, con una velocidad que depende de las propiedades físicas del medio; si se propagan en un medio elástico y continuo las partículas del medio vibran para producir una variación local de presión y por lo tanto de la densidad a lo largo de la dirección en que se propaga la onda.

En este orden de ideas, se ha desarrollado una expresión analítica que permite realizar el cálculo de la velocidad del sonido en medios sólidos, líquidos y gaseosos la cual es presentada en la ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (48)$$

Donde

B: Es del módulo de Compresibilidad en Pa.

$\rho$ : Es la densidad del medio  $\text{kg/m}^3$ .

En el océano, estos dos valores no son constantes, dado que ambos se modifican a medida que cambia con la profundidad en la cual se ubican los transductores e hidrófonos, por lo cual la ecuación 48, no es apropiada; se ha encontrado que la velocidad depende también de los siguientes factores:

- a. Ubicación geográfica donde se realiza la medición (latitud -longitud en el globo terráqueo).
- b. La estación del año.
- c. Condiciones meteorológicas.

Ahora se comprende porque para el caso específico de los océanos, se han encontrado expresiones experimentales de la velocidad donde solo dependen de tres parámetros sencillos de medir, es decir (Urlick, 1983)  $C(Z, S, T)$ .

Donde:

- a. Temperatura (T), En grados Celsius.
- b. Salinidad (S), en unidades de partes por millar.
- c. Presión o profundidad (Z), se puede encontrar en metros, kilómetros o en decibares dependiendo el autor consultado.

Así por ejemplos, de acuerdo con Kinsler. L; Frey. A; Coppenn. A; Sanders. J (Kinsler, Frey, Coppenn, & Sander, 2000), una de las más exactas es la ecuación de Lovett, J. Acous, presentada en las ecuaciones de 49 a 51:

$$C(Z, S, t) = 1449.05 + 45.7t - 5.21t^2 + 0.23t^3 + (1.333 - 0.126t + 0.009t^2)(S - 35) + \Delta(z) \quad (49)$$

Donde:

$$\Delta(Z) = (16.23 + 0.253t)Z + (0.213 - 0.1t)Z^2 + [0.016 + 0.0002(S - 35)](S - 35)tZ \quad (50)$$

Esta expresión es válida para latitud de 45°, sin embargo, para otras latitudes se deben introducir un cambio, consistente en remplazar Z, tal como se indica a continuación en la ecuación 51 (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009):

$$Z(1 - 0.0026\cos\phi) \quad (51)$$

Donde:

$\phi$ : Es la Latitud del sitio de operación dado en grados.

S: Corresponde a la Salinidad en unidades de partes por millar.

Z: Es la profundidad en kilómetros.

t: Es un décimo de la Temperatura en grados Celsius,  $t=T/10$ .

Nota: esta expresión es validad hasta profundidades de 4Km.

La figura 21, presenta unos datos tomados de manera aleatorios donde se pueden sacar las siguientes conclusiones pertinentes:

- La relación entre la velocidad y la temperatura es prácticamente lineal, a mayor temperatura mayor es la velocidad.
- La velocidad varia en menor proporción con la salinidad, sin embargo, a mayor salinidad mayor es la velocidad.
- Incrementos de Temperatura de 5°C, traen como consecuencia un aumento de la velocidad del sonido del 1.22%.
- Incrementos de Salinidad de 10 0/00 partes por millar, implican aumento de velocidad del sonido 0.8%.

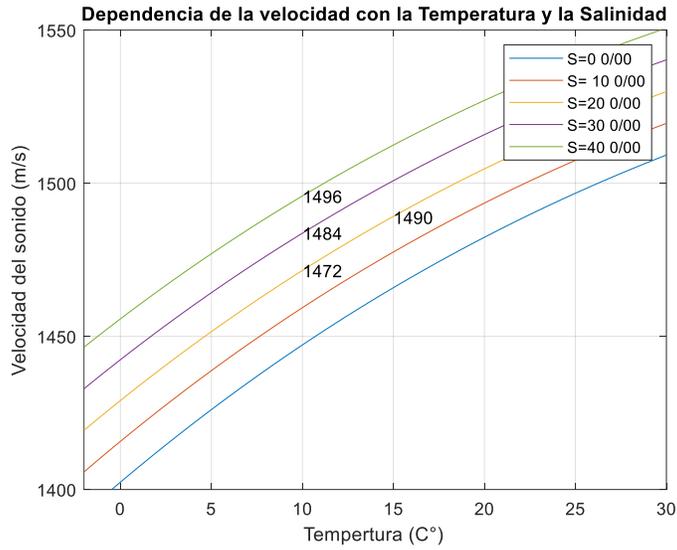


Figura 21. Dependencia de la velocidad del sonido con la Temperatura y con la Salinidad  
 Cálculo utilizando la expresión de Lovett, en latitud  $10^{\circ} 25' 30''$ , correspondiente a la ciudad de Cartagena y sobre la superficie del mar, es decir  $Z=0$  Km  
 Fuente: propia

Ahora se observará la dependencia de la velocidad del sonido con respecto a la presión, es decir con la profundidad, para lo cual observemos la figura 22, donde se ha hecho variar la profundidad manteniendo la salinidad de 35 0/00 partes por millar, Temperatura de  $34^{\circ}\text{C}$ . No se debe realizar mucho esfuerzo para concluir que esta relación es lineal, para el caso hipotético, que se presenta, se concluye que en un aumento de 500m la velocidad se incrementa 0.6%.

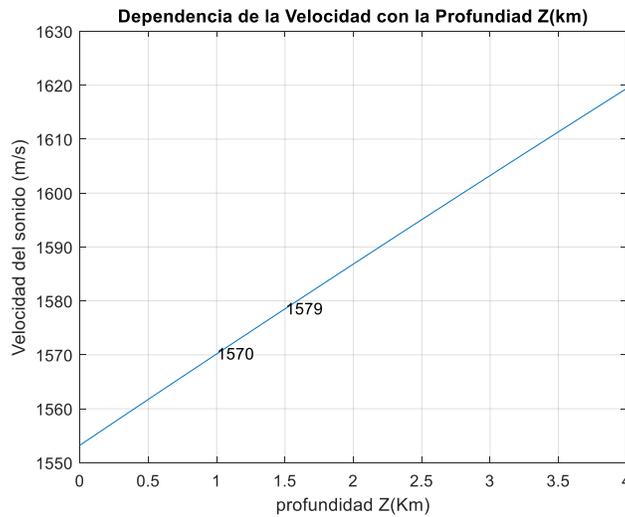


Figura 22. Dependencia de la velocidad del sonido con la presión  
 Cálculo utilizando la expresión de Lovett, en latitud  $10^{\circ} 25' 30''$ , correspondiente a la ciudad de Cartagena y Temperatura constante de  $34^{\circ}\text{C}$  y salinidad de 35 0/00 partes por millar  
 Fuente: propia

Agreguemos a lo anterior el hecho de que existen otras expresiones analíticas que permiten realizar cálculo de la velocidad del sonido (Urick, 1983), las cuales son presentadas a continuación en la Tabla 1 y varían de acuerdo con los rangos de temperatura, salinidad y profundidad para las cuales fueron determinadas.

Tabla 1. Otras expresiones experimentales para el cálculo de la velocidad del sonido en el océano.

Expresión analítica para el cálculo de la velocidad	Limites	Referencia
$C = 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + \frac{Z}{61};$	$-2 \leq T \leq 24.5^\circ$ $30 \leq S \leq 42$ $0 \leq Z \leq 1000$	Leroy, C.C.
$C = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2}T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 10^{-2}T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2}Z$	$0 \leq T \leq 35^\circ$ $0 \leq S \leq 45$ $0 \leq Z \leq 1000$	Medwin, H.
$C = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}Z + 1.675 \times 10^{-7}Z^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TZ^3$	$0 \leq T \leq 30^\circ$ $30 \leq S \leq 40$ $0 \leq Z \leq 8000$	Mackenzie, K.V.

Dónde: Z= profundidad en metros; S= salinidad en parte por mil; T=Temperatura en grados Celsius.

### 1.9.2. Perfiles de Velocidad del sonido (Sound Speed Profiles SSP).

Los perfiles de velocidad del sonido o SSP, son gráficos que muestran los cambios de la velocidad a medida que la profundidad aumenta, como ya se había indicado arriba, depende de factores como: ubicación geográfica en la tierra, estación del año y condiciones meteorológicas; además ya se había concluido que el factor salinidad puede ser considerado como un valor constante, sin embargo, en sitios donde se mezclan agua dulce con la del mar conocidos como estuarios, la salinidad es variable (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009).

A lo largo de la exposición anterior, se hizo evidente que contar con perfil de la temperatura, es de importancia para el estudio del comportamiento de la propagación de las ondas acústica; para su elaboración, se cuenta con diferentes equipos como son:

- Batitermógrafo XBT, el cual es lanzado desde un buque en movimiento, por lo tanto, no es recuperable y a medida que desciende registra de manera automática el perfil Temperatura vs. Profundidad.
- CDT de común uso en los buques oceanográficos, el cual, a diferencia del anterior, el buque debe estar fondeado, para poder realizarse las mediciones no solo del perfil de T-Z, sino que registra otros parámetros adicionales como son: presión, oxígeno disuelto en el agua, turbidez.

La velocidad se incrementa con el aumento de la temperatura y la profundidad, por lo tanto, son dos tendencias que se oponen en el océano:

- A medida que aumenta la profundidad lo hace también la presión, por lo tanto, se espera que lo haga también la velocidad del sonido.
- Pero al aumentar la profundidad, la temperatura disminuye y este efecto debe provocar una disminución de la velocidad.

Por lo tanto, los perfiles de la velocidad cambian de acuerdo con esta mezcla y su comportamiento será el resultado de cual impera más sobre el otro en un punto determinado, dependiendo de factores como la hora del día, las olas y el viento presente sobre la superficie del mar.

De acuerdo con Veloso Alarcón (Veloso Alarcón , 2007), para el estudio del océano los perfiles se han dividido en 4 capas principales, que pueden ser observadas en la figura 23, mientras se describen a continuación:

#### **1.9.2.1. Capa superficial.**

Esta capa se ve afectada por las condiciones del clima y las horas del día, así por ejemplo se presentan dos condiciones interesantes:

- Cuando hay fuertes vientos, las aguas de la capa superficial se mezclan de manera uniforme, por lo cual se genera una zona isotérmica, que es importante, aunque no es una condición permanente. En este caso el factor imperante es la presión, por lo cual la velocidad aumenta con al aumentar la profundidad.
- Sin embargo, cuando las condiciones del clima están en calma, después de un medio día soleado, en la capa superficial se forma un intenso gradiente negativo de temperatura (es decir que la temperatura disminuye con la profundidad) (Quino Cerdan & Rabinovich, 2009).

En esta capa el sonido tiende a ser atrapado por las reflexiones de la superficie y la refracción hacia arriba.

### **1.9.2.2. Termoclina Estacional.**

Debajo de la capa superficial, se presenta una región donde la temperatura decrece con la profundidad durante en el verano, pero en el invierno por la presencia de las lluvias esta capa se fusiona con la capa superficial.

### **1.9.2.3. Termoclina Principal.**

La termoclina es una línea imaginaria que separa dos masas de agua con diferentes gradientes de temperaturas.

Se encuentra ubicada por de debajo de la Termoclina Estacional y la profundidad donde se ubica es variable, dado que depende de la estación del año y de fenómenos como el Niño.

En invierno, yace a una profundidad mayor, debido al engrosamiento de la capa superficial y por la presencia de lluvias y vientos; durante el fenómeno del Niño, la termoclina se profundiza por la presencia de aguas cálidas.

Esta capa es poco afectada por las estaciones del año, refiriéndose a la variación del gradiente de temperatura. En ella se presenta la mayor temperatura antes de entrar a una capa de aguas frías, en el mar profundo. Aunque la presión aumenta con la profundidad, el efecto neto de los cambios de temperatura y de la presión es la disminución de la velocidad del sonido.

### **1.9.2.4. Capa Isotérmica profunda.**

Es una capa casi isotérmica hasta el fondo marino y no es afecta por las condiciones climáticas. La velocidad del sonido se incrementa con el aumento de presión. Al aumentar las latitudes esta capa se hace más próxima a la superficie el mar, hasta el punto que elimina las otras capas en los polos.

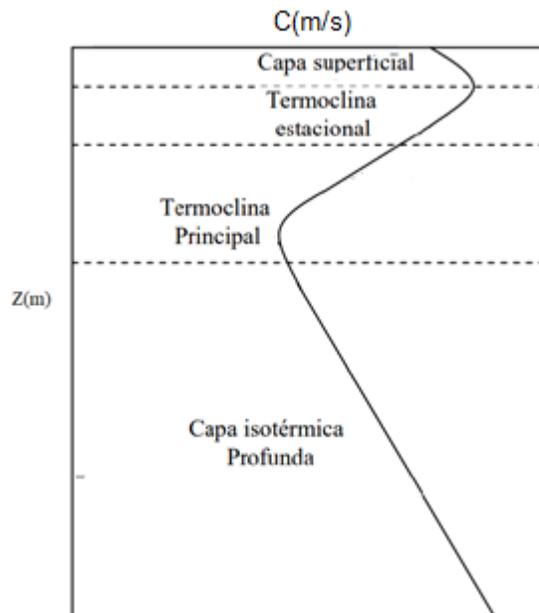


Figura 23. Se presentan las principales 4 capas, en las cuales se ha dividido el océano para el estudio del comportamiento de la velocidad del sonido. Sus profundidades dependen de las latitudes, horas del día y del clima

Fuente: Propia

Para llegar a la comprensión de comportamiento de las ondas sonoras en cada una de estas capas, es claro que finalmente dependerán de la variación de temperatura y de la presión, y de cuál de las dos impere sobre la otra en un punto determinado del océano. En forma general se puede afirmar, entonces:

- Cuando se presenta un gradiente negativo intenso de temperatura el comportamiento de la velocidad de sonido será similar, es decir disminuirá con la profundidad, como ya se afirmó, la relación entre velocidad y temperatura es casi lineal (ver Figura 24).
- Cuando se presenta una capa isotérmica en la capa superficial o en la isotérmica profunda, la velocidad del sonido aumentará a medida que aumenta la profundidad (ver Figura 24).

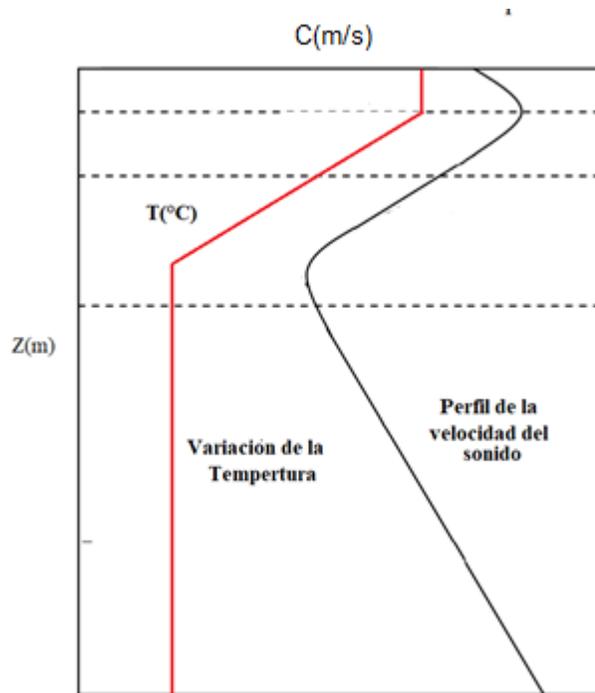


Figura 24. Se presenta como es el perfil resultante de la velocidad del sonido con respecto a la variación de la temperatura y la presión  
Fuente: Propia

### 1.9.3. Representación de las ondas sonoras mediante Rayos Acústicos.

En la literatura sobre el tema se pueden encontrar dos formas de enfrentar el asunto del estudio de las ondas sonoras acústicas, el primero es conocido como la Teoría de los Modos normales y el segundo es la Teoría de rayos.

La metodología de la primera consiste en la solución matemática de la ecuación de ondas, tomando en consideración de la difracción cuyas soluciones tiene validez para problemas que involucran bajas frecuencias.

Por otro lado, la Teoría de Rayos, parte de la suposición de la existencia de frentes de ondas y de rayos o vectores, que son perpendiculares a dichos frentes de onda, los cuales son emitidos por el transductor, ver figura 25; a diferencia del modelo de modos normales, aplica para problemas donde la característica es el uso de altas frecuencias, sin embargo, está limitado a las cortas distancias y para su solución no considera el efecto de la difracción, pero si el fenómeno de la refracción para lo cual se hace uso de la Ley de Snell.

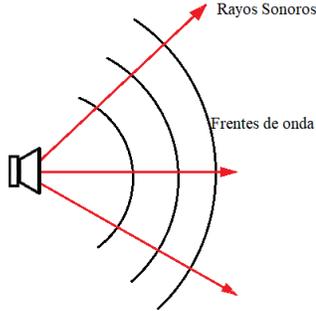


Figura 25. Conceptos de rayo y frente de onda utilizados en la Teoría de Rayos  
Fuente: Propia

### 1.9.3.1. Ley de Snell para la refracción de ondas sonoras.

La contextualización de la Ley de Snell, en el campo de la propagación de las ondas sonoras permite establecer una trayectoria aproximada, de las ondas sonoras desde que salen del transductor hasta llegar al hidrófono.

Tomando en consideración la figura 26 (a), se parte del conocimiento del perfil de velocidad con la profundidad  $C(\text{m/s})$  vs.  $Z(\text{m})$ ; esta longitud se divide en un número de  $n$  intervalos iguales, donde se consideran que la velocidad es constante y que corresponde al valor de  $C_i$ , que se calcula como el promedio de los valores extremos de cada intervalo, tal como se presenta en la figura 26(b). En cada uno de estos  $n$  intervalos se podrá aplicar la ley de Snell, de acuerdo como se presenta en la figura 26(c), utilizando la ecuación (52).

$$\frac{C_1}{\cos\theta_1} = \frac{C_2}{\cos\theta_2} = \frac{C_3}{\cos\theta_3} = \dots \quad (52)$$

Generalizando, se tiene:

$$\cos\theta_{n+1} = \left(\frac{C_{n+1}}{C_n}\right) \cos\theta_n \quad (53)$$

Donde:

$C$ : Corresponde a los valores de velocidad del sonido obtenidos el perfil de velocidad  $\text{m/s}$ .

$\theta$ : Es el ángulo formado entre la dirección del rayo y la horizontal en grados.

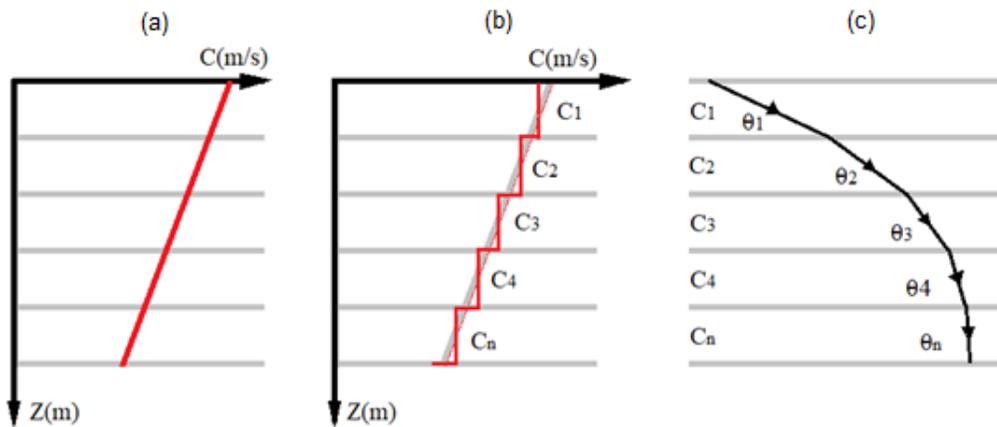


Figura 26. Se muestra como la velocidad presentada en el perfil de velocidad del sonido se aproxima como constante, por capas por facilidad de la aplicación del Snell  
Además, el ángulo considerado en dicha ley es el ángulo entre el rayo y la horizontal  
Fuente: Propia

De acuerdo con, Urick (Urick, 1983), en el océano los rayos de interés son los que son casi horizontales, por lo cual el ángulo  $\theta$  entre el rayo y el plano horizontal es de  $90^\circ$  por lo cual es común escribir la Ley de Snell como:

$$C_o = \frac{c_1}{\cos\theta_1} = \frac{c_2}{\cos\theta_2} = \frac{c_3}{\cos\theta_3} = \dots \text{constante} \quad (54)$$

Donde  $C_o$  es la velocidad en una profundidad (real o extrapolada), donde el rayo se hace horizontal.

Los perfiles complicados como los mostrados en la figura 23, son simplificados al momento de aplicar la ley de Snell, tal como es presentado en la figura 26, con el objetivo de separar el análisis en segmentos, cada uno lo suficientemente corto como para considerar que la velocidad en el mismo es constante.

La ventaja de esta consideración, es que la trayectoria del rayo sonoro en una capa de agua donde el gradiente es constante "g", es un arco de círculo cuyo centro está a una profundidad donde la velocidad del sonido se extrapola a cero (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander, 2000).

Considere la figura 24, donde se aprecia una porción de una trayectoria de un rayo bajo las condiciones descritas en el párrafo anterior, se puede concluir que:

- Si la velocidad es constante, entonces el gradiente de velocidad "g", también lo será:

$$g = \frac{c_2 - c_1}{\Delta Z} \quad (55)$$

- De la figura 27, se puede obtener el valor de  $\Delta Z$ , mediante la expresión:

$$\Delta Z = R(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (56)$$

- Combinando las expresiones (55) y (56) se puede llegar una expresión para el radio del arco R:

$$g = \frac{C_2 - C_1}{R(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)} \quad (57)$$

Utilizado la ecuación 54 en 57 se obtiene:

$$g = \frac{C_2 - C_1}{R \left[ \frac{C_1}{C_o} - \frac{C_2}{C_o} \right]} = -\frac{C_o}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{C_i}{\cos\theta_i}$$

Finalmente se obtiene el valor de radio de arco descrito por el rayo sonoro:

$$R = -\frac{C_o}{g} = -\frac{C_i}{g \cos\theta_i} \quad (58)$$

Observaciones para su aplicación:

- Si el gradiente de velocidad es positivo, R sería negativo y la trayectoria sería hacia arriba.
- Si el gradiente de velocidad es negativo, R sería positivo y la trayectoria del rayo del sonido sería hacia abajo.

Una vez conocido el radio de curvatura de cada uno de los segmentos, en que fueron divididos el perfil de velocidad, la trayectoria real del rayo sonoro puede calcularse e incluso graficarse.

En consecuencia, si el ángulo inicial, es el ángulo de depresión del transductor, es decir:  $\theta_o$  observando la figura 27, pueden encontrar los alcances horizontal y vertical mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta L_i = \frac{1}{g} \frac{C_i}{\cos\theta_i} (\sin\theta_i - \sin\theta_{i+1}) \quad (59)$$

$$\Delta Z_i = \frac{1}{g} \frac{C_i}{\cos\theta_i} (\cos\theta_{i+1} - \cos\theta_i) \quad (60)$$

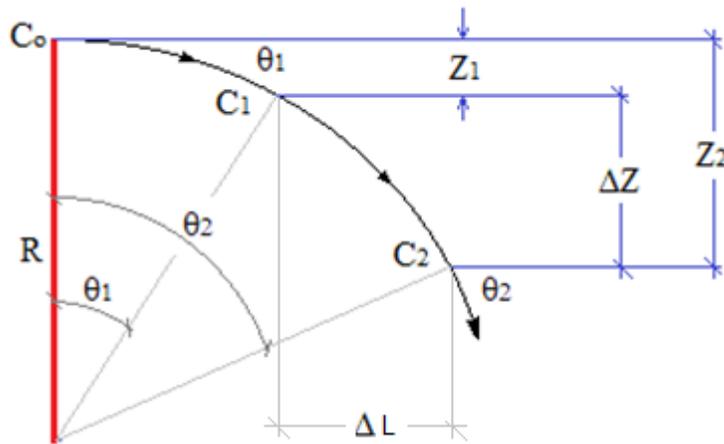


Figura 27. Para capas de agua donde la velocidad puede ser considerada como constante y que solo depende de la profundidad, la trayectoria que sigue el rayo sonoro es un arco de círculo  
Fuente: Propia

## 1.10. Pérdidas por transmisión (TL).

Como cualquier señal que se propaga en un canal de comunicaciones, llámese aire, conductores de cobre, fibra óptica u otras, de igual manera las ondas acústicas, también sufren pérdidas al propagarse desde de transductor al hidrófono. Estas pérdidas principalmente son debido a dos motivos (Etter, 2003):

- Pérdidas por propagación o divergencia geométrica.
- Pérdidas por absorción.

Las pérdidas totales finamente serán la contribución de estos factores, es decir:

$$TL = TL_{propagación} + TL_{absorción} \quad (61)$$

Una vez encontradas estas, de manera analítica se calculan como:

$$TL(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{1yd}}{I_r} \right] \quad (62)$$

Donde:

$I_{1yd}$ : La intensidad medida a una yarda de transductor en  $w/m^2$ .

$I_r$ : Intensidad medida a una distancia  $r$ , medidas en yardas  $w/m^2$ .

Por la forma en que se define, es claro concluir que las pérdidas no dependen de las unidades de la presión de referencia que hayan sido empleadas.

### **1.10.1. Pérdidas por propagación o divergencia geométrica.**

Las pérdidas por la propagación, corresponden al hecho que las ondas sonoras al salir del transductor divergen en diferentes direcciones de acuerdo con la geometría del mismo; al alejarse de la fuente, los frentes de onda cubren cada vez áreas mayores, por lo tanto, si la potencia no cambia, esta quedaría distribuida cada vez en mayores superficies; es decir, la intensidad de potencia,  $I \left( \frac{W}{m^2} \right)$ , será menor, al alejarse de del transductor.

Por otro lado, las ondas sonoras inicialmente, se propagarán con frentes de ondas que serán esferas concéntricas, pero al alejarse existirá un momento donde quedaran confinadas entre la superficie del mar y el fondo del océano, momento en el cual la propagación se realizará con frentes de ondas, cilíndricas (Etter, 2003).

A continuación, se encontrarán expresiones para las pérdidas de Transmisión para estos dos momentos.

#### **1.10.1.1. Propagación Esférica.**

Para este caso se supone que el hidrófono, encargado de recibir señal emitida por el transductor, se encuentra en un lugar geométricos donde los frentes de ondas son esféricos, y a una distancia R; estos puntos son en realidad ubicaciones a corta distancia al transductor.

Como se recordará:

$$Pot = Area \times Intensidad$$

Además, debemos suponer que no existen pérdidas adicionales debido a otra naturaleza, por lo tanto, la potencia distribuida en el área a diferentes distancias, serán iguales (Waite, 2002):

$$Pot = A_1 I_1 = A_2 I_2$$

$$Pot = (4 \pi R_1^2) I_1 = (4 \pi R_2^2) I_2$$

Simplificando:

$$Pot = R_1^2 I_1 = R_2^2 I_2$$

Si las distancias están en yardas y, además, se toma de referencia  $R_1 = 1 \text{ yd}$

$$Pot = I_1 = r_2^2 I_2$$

De acuerdo a la definición en la ecuación 62:

$$TL(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{I_{1yd}}{I_r} \right]$$

$$TL(dB) = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log R_2^2$$

En general para cualquier distancia  $R$  en yardas:

$$TL(dB) = 20 \log R \quad (63)$$

Donde  $R$  es en coordenadas esféricas.

### 1.10.1.2. Propagación Cilíndrica.

Este modelo es propicio para propagación de ondas sonoras en aguas poco profundas, donde el fondo y la superficie limitan la propagación de frentes de ondas, esféricas convirtiéndolas en cilíndricas (Waite, 2002); tomando las mismas consideraciones del caso anterior, se obtiene:

$$Pot = (2\pi r_1 H) I_1 = (2\pi r_2 H) I_2$$

Donde  $H$ , corresponde a la altura del cilindro, por lo tanto, es la distancia entre superficie del mar y el fondo del océano. Considerando que tiene un valor  $r_1 = 1$  yd

$$TL(dB) = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log r_2$$

En forma general para cualquier distancia  $r$ , bajo las condiciones de propagación asumidas arriba, se tendrá:

$$TL(dB) = 20 \log r \quad (64)$$

Dónde:  $r$  es en coordenadas cilíndricas.

### 1.10.2. Pérdidas por absorción.

Las pérdidas por absorción en el océano son originadas por la conversión de la energía acústica en calor (Urlick, 1983), y se calcula mediante la expresión (Waite, 2002):

$$TL_{abs} = \alpha \times r \times 10^{-3} \text{ dB/Kyd} \quad (65)$$

Donde:

r: Corresponde a la distancia de separación entre transductor e hidrófono, en yardas.

$\alpha$ : Es el coeficiente de absorción en unidades de dB/kyd.

Nota: El factor  $10^{-3}$  en la ecuación (65) es necesario cuando r está expresado en yardas, con el objeto de que las unidades sean consistentes.

Una expresión empírica denominada Ecuación de Thorp (Urick, 1983), permite el cálculo del coeficiente de absorción  $\alpha$ , en función de la frecuencia para el caso del océano ver la figura 28.

$$\alpha(dB/Kyd) = \frac{0.1 f^2}{1+f^2} + \frac{40 f^2}{4100+f^2} + 2,75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (66)$$

Donde:

f: Corresponde a la frecuencia en KHz de la onda sonora

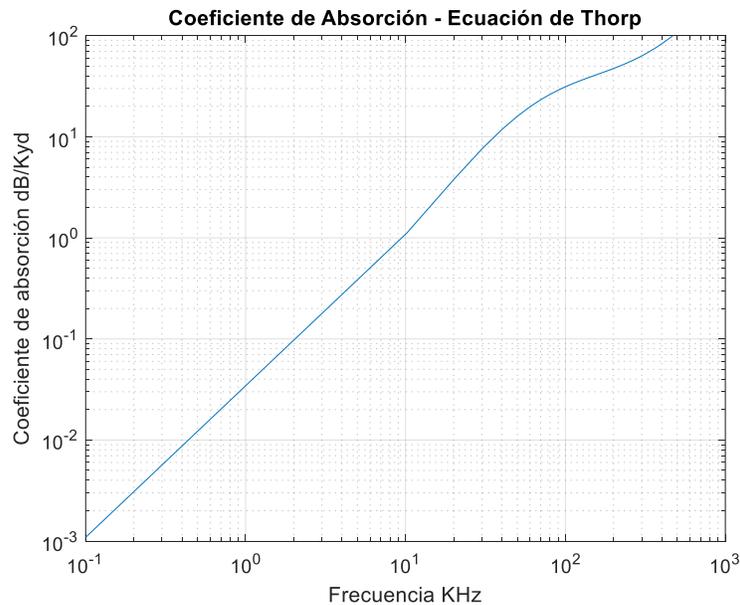


Figura 28. Coeficiente de absorción con respecto a la frecuencia  
Fuente: Propia

La absorción es proporcional a la frecuencia de operación y la distancia, pero además la profundidad juega un papel importante en la determinación de las pérdidas de transmisión puesto depende de la presión. Este fenómeno puede ser modelado mediante la expresión (Urick, 1983):

$$\alpha_d(dB/Kyd) = \alpha_o(1 - 1.93 \times 10^{-5}d) \quad (67)$$

Donde

$d$ : Es la profundidad de transductor, en pies.

$\alpha_0$ : Corresponde al coeficiente de absorción en la superficie del mar, en unidades dB/Kyd.

$\alpha_d$ : Es el coeficiente de absorción a la profundidad  $d$  en dB/Kyd.

Como puede observarse la atenuación disminuye en aguas profundas.

En conclusión, retomando la expresión inicial para el cálculo de las pérdidas de transmisión TL, donde se indicaba que correspondía a la contribución de dos pérdidas, unas debidas a la geometría de los frentes de ondas, y la otra debido a la absorción, es decir:

$$TL = TL_{propagación} + TL_{absorción}$$

Se puede encontrar una expresión general:

$$TL(dB) = k10\log_{10}r + \alpha \times r \times 10^{-3} \quad (68)$$

Donde

$k$ : Es una constante que será 1 para geometría cilíndrica o 2 para la configuración esférica, para obtener  $10\log_{10}r$  o  $20\log_{10}r$ , según sea el caso.

$r$ : Es la distancia entre el transductor y el hidrófono en yardas.

$\alpha$ : Coeficiente de absorción en dB/kyd.

**Nota:** El factor  $10^{-3}$  es necesario cuando  $r$  esta expresado en yardas.

A manera de ejemplo se desarrolla una gráfica de las pérdidas de transmisión para propagación esférica, para diferentes frecuencias y alcances, ver figura 29.

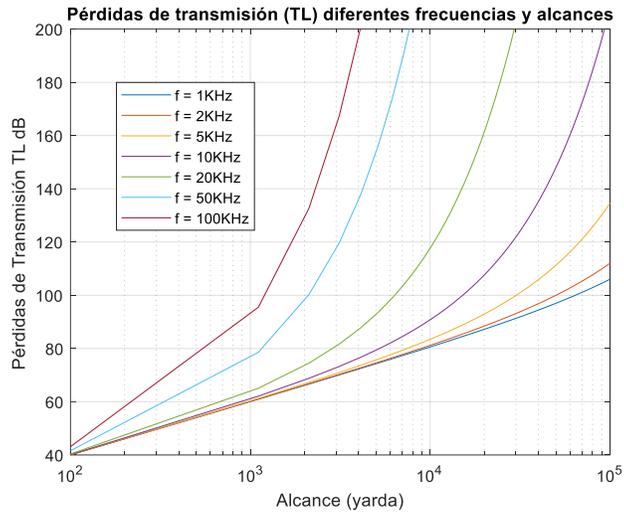


Figura 29. Pérdidas de transmisión TL(dB) para diferentes frecuencias y alcances en un sistema con frentes de onda esféricas  
Fuente: Propia

## 1.11. Umbral de Detección (DT).

El umbral de detección (Detection Thereshold, DT), está definido como la relación  $(\frac{S}{N})_{dB}$  siendo S la Intensidad de potencia sonora de la señal correspondiente al ancho de banda del receptor, sobre la Intensidad de potencia sonora del ruido en el ancho de banda de 1Hz, medido en los terminales del hidrófono (Salva Pando , 1994); mínimo requerido para que la señal sea recuperada. Su expresión analítica es:

$$DT(dB) = 10 \log_{10}(S/N) \quad (69)$$

## 1.12. Ecuación del enlace transductor hidrófono.

La ecuación del enlace, involucra de manera lógica todos estos conceptos estudiados hasta este momento, y permite establecer el alcance del sistema implementado bajo diferentes condiciones, del canal de los equipos seleccionados.

Los parámetros que intervienen pueden ser clasificados, como aquellos determinados por los equipos y otros determinados por el canal.

### 1.12.1. Parámetros determinados por los equipos.

Entre los cuales se encuentran:

- Nivel de la fuente (SL) propio del transductor.
- Índice de directividad (DI), este parámetro se encuentra tanto como en el transductor como en el hidrófono.
- Umbral de detección (DT), parámetro de medido en el hidrófono.
- Ancho de banda, (BW) parámetro transversal del sistema de comunicaciones.

### 1.12.2. Parámetros determinados por el canal.

Estos parámetros son propios del medio que atraviesa la señal, los considerados son los siguientes:

- Ruido Ambiental (NL).
- Perdidas de Transmisión (TL).

Se debe recordar que varios de estos parámetros dependen de la presión de la referencia que en nuestro caso es considerado  $1\mu\text{Pa}$  o bien el  $1\mu\text{Bar}$ .

La ecuación se deduce de un diagrama muy sencillo que es el siguiente:

- El transductor emite un Nivel de intensidad, radiada hacia una dirección (SL).
- En el trayecto hacia el hidrófono, la señal sufre pérdidas de transmisión (TL).
- En nivel de intensidad que llega al hidrófono será SL-TL.
- Como el hidrófono es omnidireccional en el presente caso, al sistema solo ingresará una parte del Ruidos Ambiental, aquella parte que entre en la zona de cobertura del hidrófono, es decir:  $NL - DI_{rx}$ .
- Para establecer el enlace, se requiere que el valor obtenido sea mayor igual al Umbral de detección (DT).

Retomando la ecuación 1, al inicio de este capítulo:

$$SL - TL - (NL - DI) > DT \quad (1)$$

Así, las expresiones utilizadas son las siguientes:

$$SL = 171.5 + 10\log_{10}Pot + DI + E \quad (48)$$

$$TL(dB) = k10\log_{10}r + \alpha \times r \times 10^{-3} \quad (68)$$

$$DT(dB) = 10 \log_{10}(S/N) \quad (69)$$

Y realizando el reemplazando todos los valores obtenidos en este recorrido se obtiene:

$$(171.5 + 10\log_{10}Pot + DI_{tx} + E) - (k10\log_{10}r + \alpha \times r \times 10^{-3}) - (NL - DI_{rx}) > DT \quad (70)$$

La ecuación 70 corresponde a la ecuación del enlace.

Donde:

Pot: Potencia en W, que es suministrada al transductor.

$DI_{tx}$ : Índice de Directividad del Transductor en dB.

k: Constante de divergencia geométrica; k=1, cilíndrica; 2 esférica.

$\alpha$ : Índice de absorción en dB/Kyd.

r: Distancia entre transductor e hidrófono en yardas

NL: Intensidad sonora del ruido

$DI_{rx}$ : Índice de Directividad del hidrófono en dB.

E: Es la eficiencia del transductor, valor comprendido entre 20% - 70%.

DT: Umbral de detección, relación S/N mínima en el hidrófono para poder detectar la señal en dB.

## 1.13 Variables que intervienen en la propagación de las ondas sonoras en el medio submarino

Realizando un análisis de las ecuaciones involucradas en el cálculo del balance energético en un enlace de comunicaciones acústico submarino, nos encontramos con el hecho de que existen variables sobre las cuales no pueden ser controladas y otras sobre las cuales, si se puede hacer un tipo de manejo, aunque sea en una medida limitada.

### 1.13.1. Variables no susceptibles al control.

Entre las variables relacionadas con el canal se tienen:

Temperatura en el del mar °C.

Nivel de salinidad del mar ppm.

- Perfil de velocidad del sonido m/s.
- Velocidad de los vientos m/s.
- Tráfico marítimo adimensional.

Entre las variables relacionadas con los equipos instalados, se tienen:

Índice de Directividad del transductor dB.

Frecuencia de resonancia del transductor kHz.

- TVR del Transductor dB.

Índice de Directividad de hidrófono dB.

- RVR del hidrófono dB.

### 1.13.2. Variables susceptibles al control.

A continuación, se presenta un listado de las variables susceptible a ser modificadas durante la simulación.

- Profundidad del Transductor pies.
- Profundidad del hidrófono pies.
- Distancia entre transductor e hidrófono yardas.
- Tensión de alimentación al transductor en v
- Modulación digital utilizada.
- Tiempo de bit  $T_b$  en s.

## Capítulo 2: Descripción de la Bahía de Cartagena.

Dado que el proyecto se desarrolló en la bahía interna de la ciudad de Cartagena, y de manera específica en las playas circundantes a las instalaciones de la Escuela Naval Almirante Padilla, es pertinente realizar una descripción de las principales características de la bahía que hacen parte del grupo de variables involucradas en la solución del problema.

Para comenzar con esta descripción, digamos que la bahía de Cartagena está localizada al noroeste de Sudamérica (Caribe Colombiano) en las coordenadas: latitud  $10^{\circ}21'54''$  N y longitud  $75^{\circ}31'48''$  O, con una superficie del plano de agua de  $82\text{km}^2$ , y profundidades promedio y máximas de 16 y 26 m, respectivamente (Grisales López, Salgado Mesa , & Morales Babra , 2014).

Al oeste de la bahía se encuentra la isla de Tierra bomba, cuya ubicación genera dos salidas al mar abierto; la primera conocida como Bocagrande, la cual está ubicada al noreste; la segunda conocida como Bocachica, al suroeste de Tierrabomba.

Bocagrande tiene una barrera submarina, prohibida para el tránsito de buques de alto calado, llamada La Escollera, lo cual limita de cierta manera, el intercambio de aguas entre la bahía y el mar caribe, dado que en esta zona se encuentran profundidades entre 0.6 y 2.1m (Restrepo , y otros, 2013), (ver Figura 30).

Continuando con la descripción de la Bahía, al suroeste de la misma, se encuentran tres canales de acceso, siendo el principal de ellos y el más profundo, el de Bocachica; el siguiente en importancia es el conocido como Canal Varadero y el último, se encuentra entre la Isla Draga y Abanico, con profundidades máximo de 2 metros; finalmente; al sureste del a bahía, se localiza el canal del Dique, que descarga aguas dulces, provenientes del Rio Magdalena.

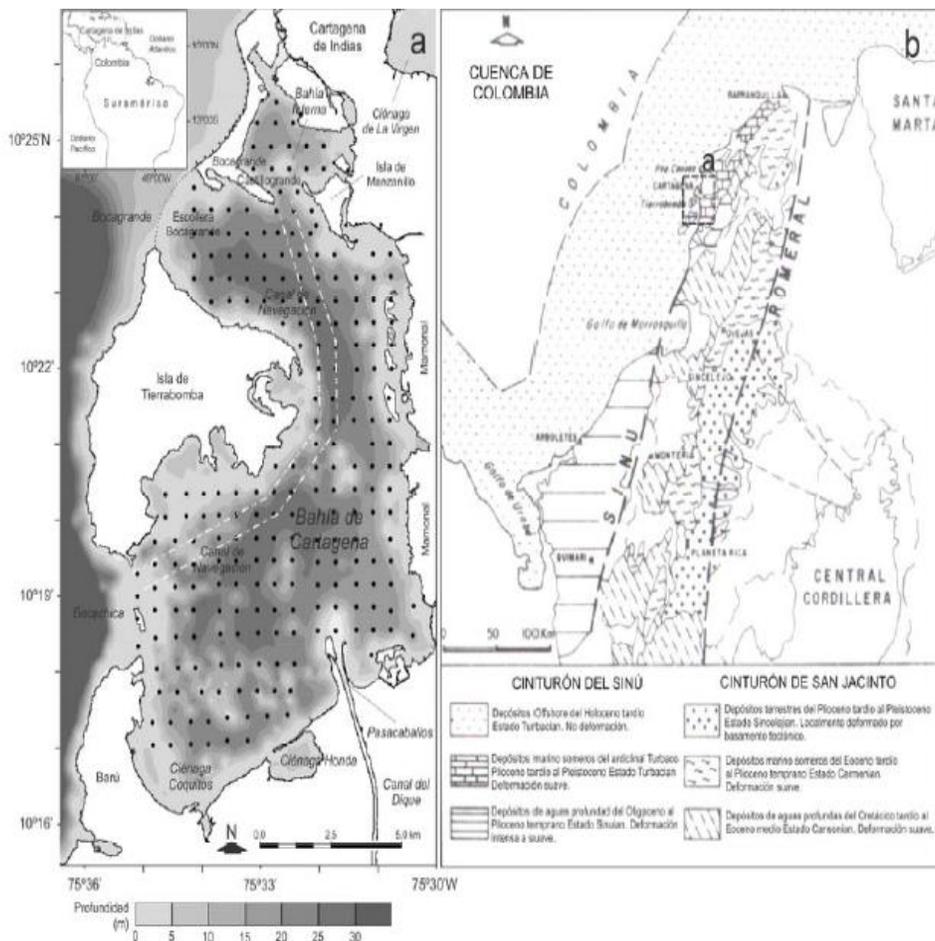


Figura 30. a) Localización de la bahía de Cartagena b) Mapa Geológico de nor-occidente de Colombia Fuente: Restrepo, J. et al; (2013). Bahía de Cartagena (Colombia): distribución de sedimentos superficiales y ambientes sedimentarios. *Latin American journal of aquatic research*, 41(1), 99-112. Disponible en <https://dx.doi.org/103856/vol41-issue1-fulltext-8>

## 2.1. Principales Características.

Demos un vistazo a las principales características físicas de la bahía de Cartagena, que intervienen en el cálculo del funcionamiento de un sistema de comunicaciones acústico submarino; estas están relacionadas con las variables que determinan la velocidad de la propagación del sonido en las aguas de la bahía de Cartagena, como lo son la temperatura y la salinidad con respecto a la profundidad y la velocidad de los vientos que serán un aporte significativo al momento de realizar el cálculo del ruido de fondo o ambiental.

### 2.1.1. Velocidad de los vientos durante las diferentes épocas del año.

De acuerdo con Restrepo, J., Franco, D., Escobar, J., Correa, I., Otero, L. y Gutiérrez, J. (Restrepo, y otros, 2013) el régimen de los vientos que dominan la circulación en la bahía de Cartagena es variable a lo largo de las diferentes épocas de año así:

- Durante la época seca la cual se da entre los meses de diciembre a abril, el Canal del Dique registra sus caudales más bajos  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ ; en esta época del año se experimentan vientos estables provenientes del noreste, conocidos como alisios, con velocidades de aproximadamente  $8 \text{ m/s}$ .
- Existe una época de transición, de seca a húmeda propiamente dicha, que se da entre los meses de abril a junio, que coincide con un aumento moderado del caudal en el Canal del Dique hasta valores aproximados de  $250 \text{ m}^3/\text{s}$ ; curiosamente se presentan en momentos donde los vientos son menos intensos con velocidades próximas a  $5 \text{ m/s}$ , y con dirección (norte, noreste, este y sureste).
- En la época húmeda, la cual es propia de los meses comprendidos entre agosto y noviembre, aunque el caudal del Canal del Dique se incrementa de manera significativa llegando incluso a valores superiores a  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , se experimentan vientos débiles provenientes principalmente del suroeste.

### 2.1.2. Temperatura.

Un parámetro de suma importancia a la hora de establecer el comportamiento de la velocidad de la propagación de las ondas sonoras en el canal acústico es la temperatura, en este orden de ideas en el boletín científico del CIOH No 4 de junio de 1982 (Pagliardini, y otros, 1982), afirman que el promedio de temperatura anual es de  $27.9^\circ\text{C}$ , (observaciones realizadas durante 27 años interrumpidos), además indican que las variaciones del promedio mensual a lo largo del año son inferior de  $2^\circ\text{C}$ , lo cual se explica por la vecindad de las masas de aguas marinas cuyas temperaturas superficiales se mantienen cerca a la isoterma de  $30^\circ\text{C}$  durante todo el año; igualmente el proyecto BASIC (BASIC, 2017), indican que las condiciones de temperatura, en la bahía no han presentado variaciones importantes los últimos 40 años, pero que sin embargo la tendencia futura del cambio climático para la región Caribe para el año 2080, incluyendo Cartagena, muestran un aumento de la temperatura entre  $1.5 - 3^\circ\text{C}$ , mientras que las lluvias disminuirán entre un 10% y 40%.

De manera más específica, del Informe Síntesis del proyecto Bahía de Cartagena (Pagliardini, y otros, 1982), indican que el ciclo de variaciones de temperatura en la Bahía de Cartagena, se puede dividir en dos períodos:

- Período de lluvia: se extiende de mayo a noviembre, con una anomalía en julio conocido como el Veranillo de San Juan.
- Período de vientos: Va de diciembre hasta abril

Durante el período de lluvia, las aguas de la Bahía de Cartagena presentan una termoclina localizada entre los 0 a 10m, con el máximo durante el mes de octubre, con variaciones entre el fondo (en promedio 25m) y la superficie del mar de 4°C.

Sin embargo, en el periodo de vientos, la termoclina desaparece, dejando una columna de agua homogénea y temperatura inferior que la presente en los periodos de lluvias. (Pagliardini, y otros, 1982).

Otra información pertinente a este tema lo encontramos en el Atlas de los datos oceanográficos de Colombia 1922 – 2013 (Andrade Amaya , Rangel Parra, & Herrera Vásquez , 2015), donde se presentan gráficos específicos sobre el comportamiento de la temperatura en la superficie y a 20m de profundidad, para las diferentes épocas del año en la vecindad de la bahía de Cartagena, tal como puede apreciarse en las Figuras 31 a 34

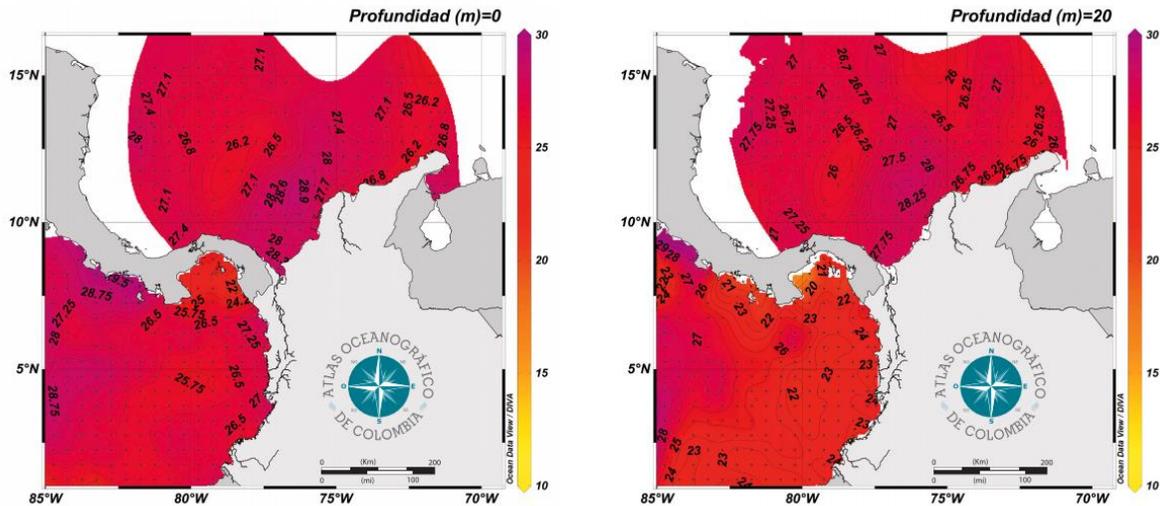


Figura 31. Temperatura entre los meses diciembre a marzo (época de vientos) en la capa superficial Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica. Dimar – CIOH.

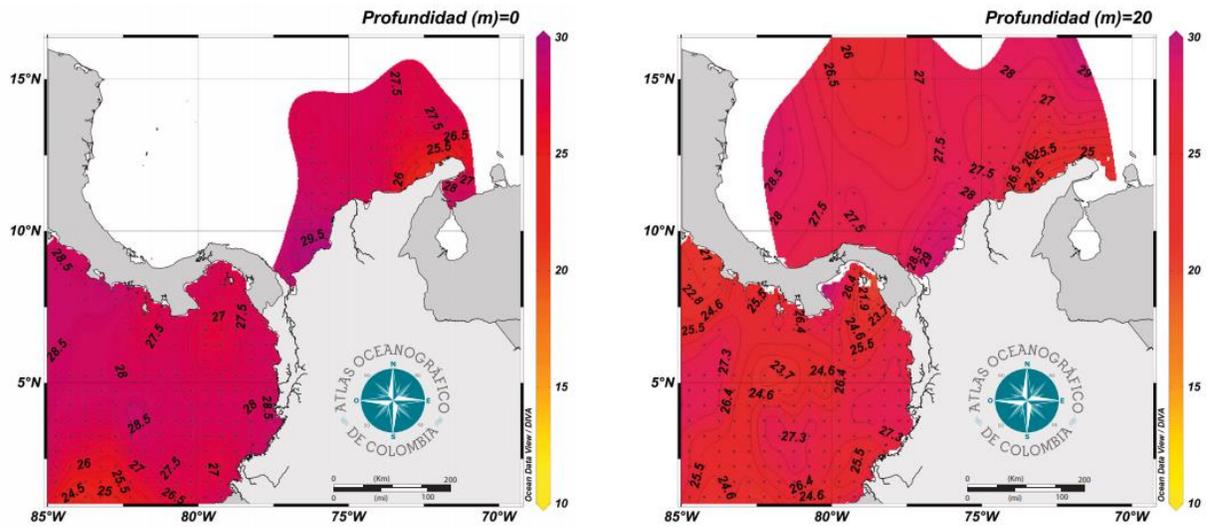


Figura 32. Temperatura entre los meses abril a mayo (época de transición) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica. Dimar – CIOH.

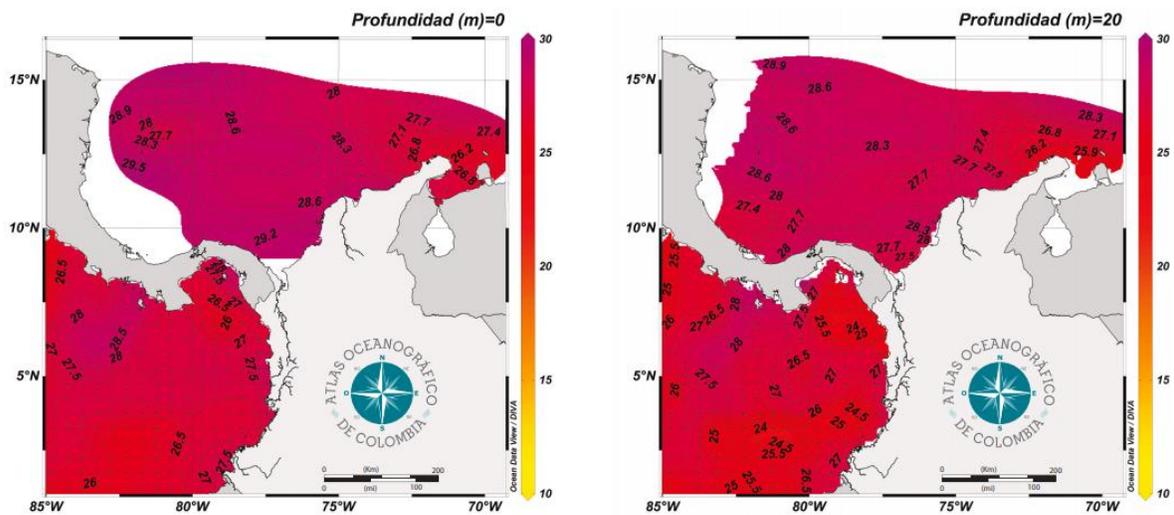


Figura 33. Temperatura entre los meses junio a agosto (época verano) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica. Dimar – CIOH.

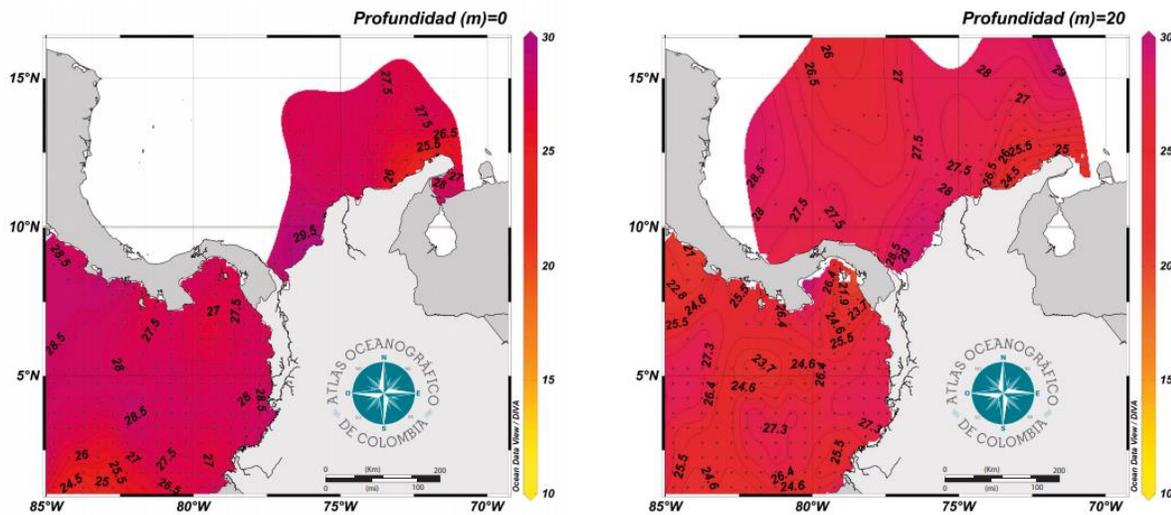


Figura 34. Temperatura entre los meses septiembre a noviembre (época de lluvias) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica. Dimar – CIOH.

### 2.1.3. Salinidad.

El otro parámetro que acompaña la presión y la temperatura, en el cálculo de la velocidad de las ondas sonoras en el océano, es la salinidad, aunque menos importancia, tal como fue discutido en el capítulo 1.

En el periodo de lluvia, aparece una haloclina muy pronunciada, (es decir una capa de separación de dos masas de agua por diferencia de densidad que se produce cuando se juntan dos masas de agua, una de agua dulce y otra de agua salada; la salada es más densa y se hunde dejando el agua dulce en la superficie), presentando una leve disminución en julio durante el Veranillo de San Juan; las variaciones más importantes aparecen en Octubre, coincidiendo con la máxima época lluviosa con valores con valores extremos en la superficie que van desde 26 0/00 hasta 35 0/00. (Pagliardini, y otros, 1982)

Durante la época de vientos la dinámica de los mismo haces que se acelere la mezcla de la columna de agua, ocasionando una salinidad prácticamente uniforme de 35 0/00 – 36 0/00 en promedio. (Pagliardini, y otros, 1982).

Por otro lado, en el Atlas de los datos oceanográficos de Colombia 1922 – 2013 se pueden encontrar graficas específicas sobre el comportamiento de la salinidad para las diferentes épocas del año y diferentes profundidades, en la vecindad de la Bahía de Cartagena, tal como se aprecian en las Figuras 35 a 38

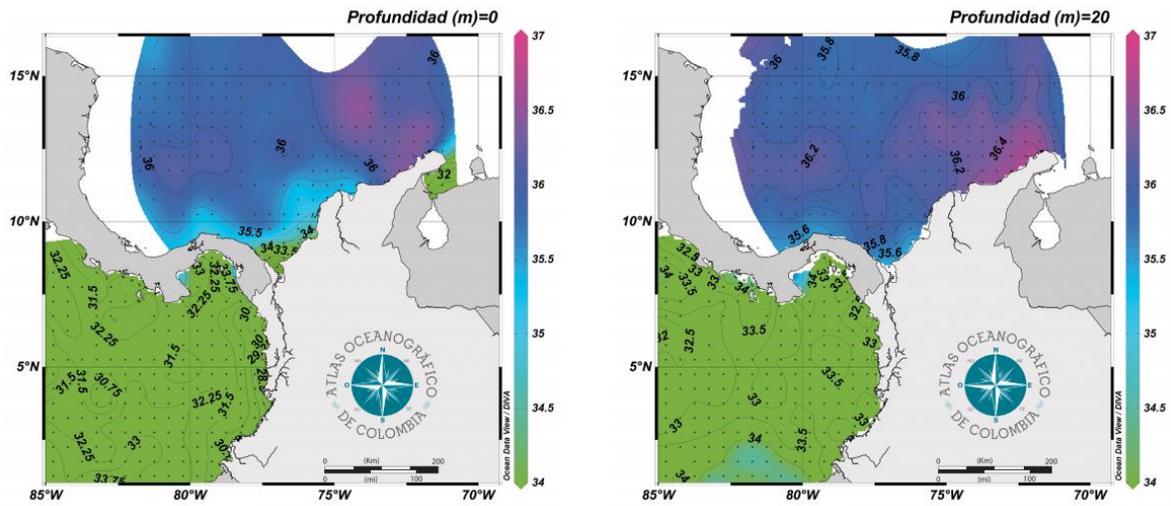


Figura 315. Comportamiento de la salinidad entre el diciembre marzo (época de vientos) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geos trófica. Dimar – CIOH.

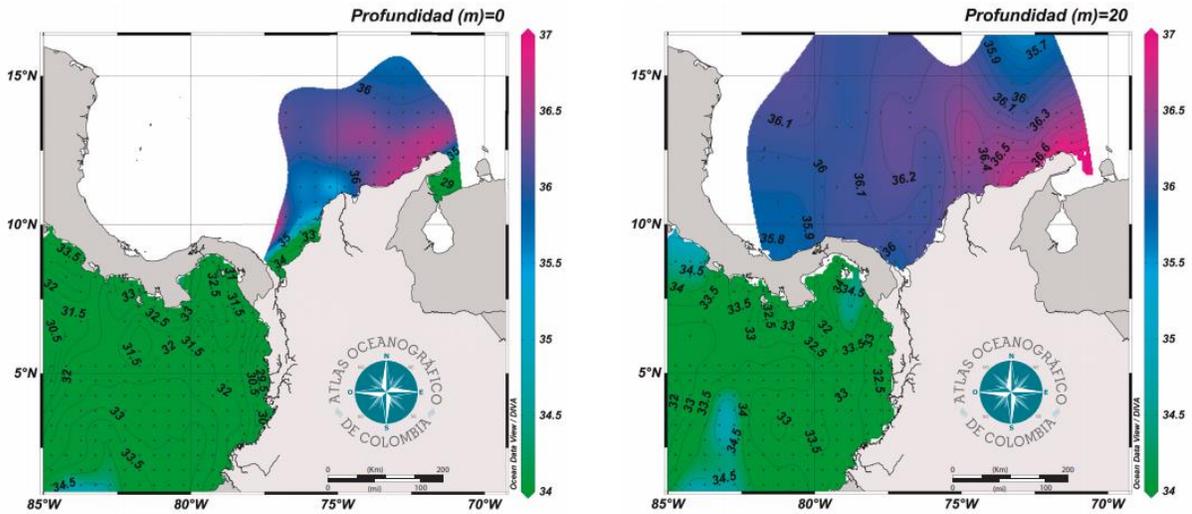


Figura 36 Comportamiento de la salinidad entre el abril y mayo (época de transición) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geos trófica. Dimar – CIOH.

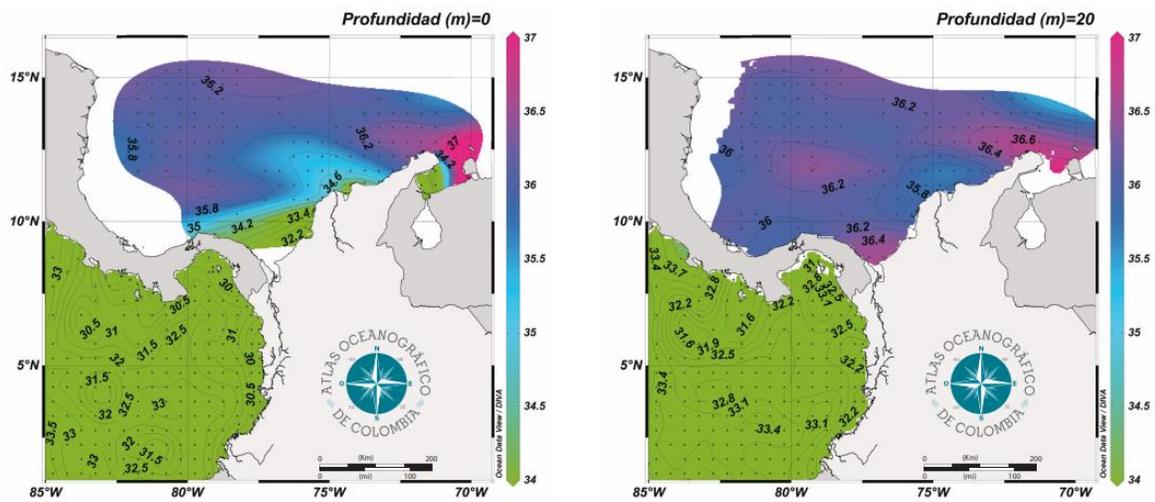


Figura 37. Comportamiento de la salinidad entre el junio agosto (época verano) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geos trófica. Dimar – CIOH.

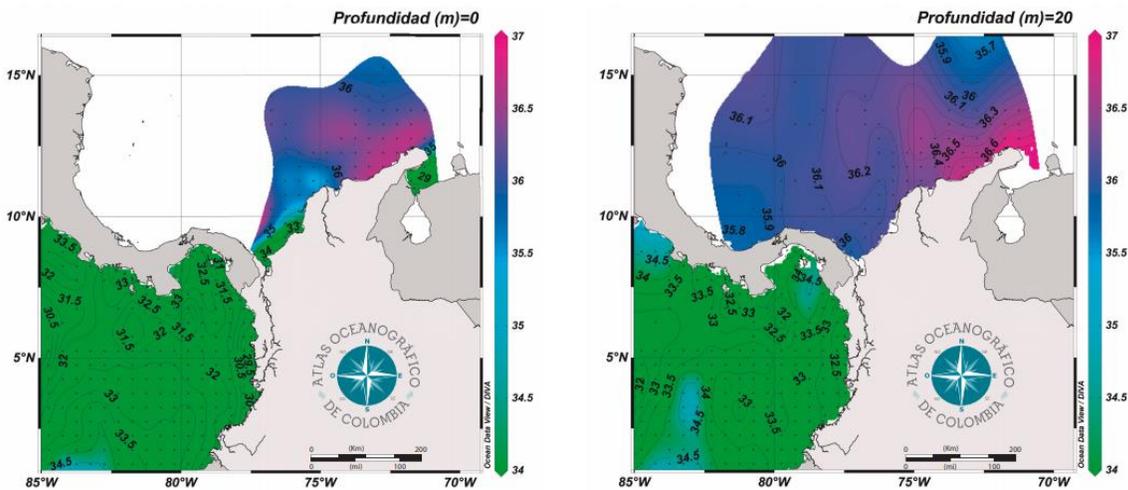


Figura 38. Comportamiento de la salinidad entre el septiembre a noviembre (época de lluvias) en la capa superficial  
 Fuente: Andrade, C. et al (2015) Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geos trófica. Dimar – CIOH.

Durante una investigación realizada por el Centro de Investigaciones Oceanográfica e Hidrográficas CIOH en fecha 19/04/2004, se realizaron mediciones de las diferentes variables físicas de la bahía de Cartagena, entre los cuales se encuentran los datos de Temperatura y Salinidad. En los apéndices K y L se pueden encontrar una tabla que contiene los promedios de dichas variables de cuales se ha obtenido una

regresión polinómica utilizando funciones de Matlab (Vidal Melo , 2017), las cuales son presentadas en la figura 39, y corresponden a las siguientes ecuaciones:

Regresión Temperatura:  $T(z) = -0.0002z^3 + 0.0093z^2 - 0.2005z + 29\text{ }^{\circ}\text{C}$  (71)

Regresión Salinidad:  $S(z) = 0.0008z^3 - 0.0497z^2 + 0.9409z + 32.47\text{ ppm}$  (72)

Data la importancia que reviste para el proyecto con tan con el perfil de velocidad del sonido, se procedió a realizar el cálculo de la misma a partir de estos datos obtenidos, en el año 2014, para lo cual se utilizaron las expresiones empíricas de Medwin y Mackenzie (Urlick, 1983), estas pueden ser observadas en la figura 39.

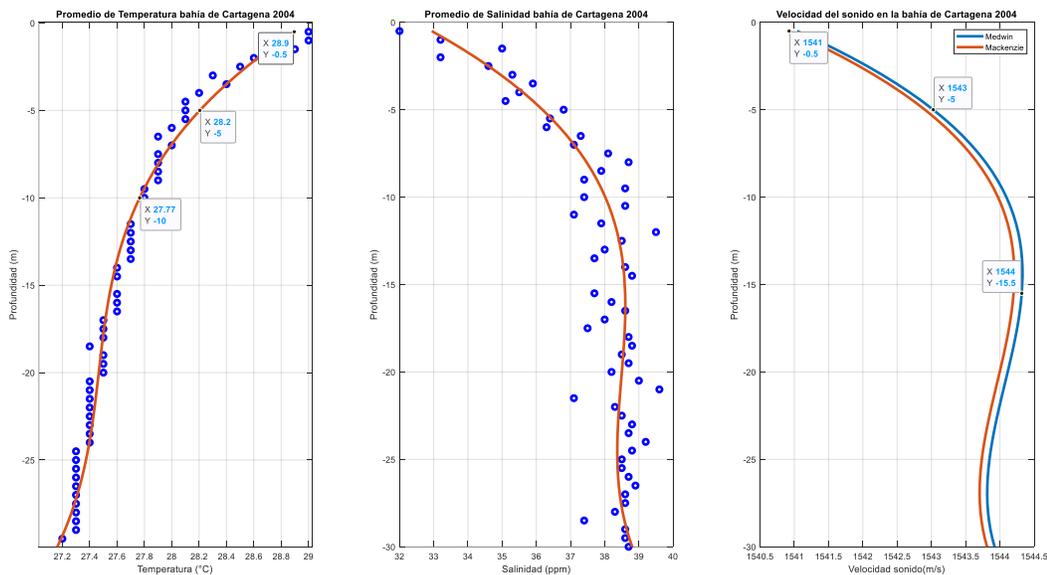


Figura 39. Curvas de Temperatura, salinidad y velocidad del sonido promedios obtenida en investigación sobre las variables físicas de la Bahía de Cartagena en el año 2004 por el CIOH.  
Fuente: propia

- De acuerdo con la velocidad obtenida en la figura 39, se observa la marcada influencia del aumento de la profundidad sobre la disminución de la temperatura en el cálculo de la velocidad.
- Se puede concluir que la variación de velocidad es prácticamente lineal en primeros 10 metros y de gradiente positivo.
- Como consecuencia del gradiente positivo de la velocidad, la onda sonora tenderá a subir y quedar atrapada en especie de guía de onda, entre los 0 y 15m; en la figura 39 se evidencia el cambio de gradiente positivo a negativo cerca a los 15m de profundidad; este punto se conoce como termoclina estacional (ver figura 23).

## **Capítulo 3: Parámetros de Transductor e Hidrófono.**

Dos elementos que revisten importancia para cualquier proyecto de comunicaciones acústicas submarina, son el transductor y el hidrófono, dado que son los dispositivos encargados de transformar las señales eléctrica que transportan la información en ondas, de presión sonoras y viceversa.

En este orden de ideas, para el caso del proyecto estuvo disponible un transductor marca Furuno, del cual se carece de información técnica disponible, por lo cual se dedicó tiempo de laboratorio para poder obtener los parámetros pertinentes; por otro lado para el hidrófono se contó con el RESON TC 4032, que de acuerdo con su hoja técnica ofrece una alta sensibilidad, bajo ruido y una respuesta de frecuencia plana en un amplio rango de frecuencias; más adelante ha hará un análisis sobre su datos técnicos del importancia para la investigación a realizar.

### **3.1. Características importantes de las celdas piezoeléctricas.**

A continuación, se realiza una revisión de los parámetros importantes de cada una de las celdas piezoeléctricas involucradas en el proyecto, con el objeto contar con la información necesaria para ser extraídas de las hojas técnicas o bien conseguirlas de manera experimental.

#### **3.1.1. Sensibilidad - Receiving Voltage Response (RVR).**

Ya había sido considerado en el capítulo 1, bajo el nombre respuesta de voltaje a circuito abierto (OCV), sirve para expresar la tensión de salida generada en los terminales del hidrófono a circuito abierto, a partir de la recepción de una determinada presión sobre celda piezoeléctrica.

En consecuencia, a lo anterior se define como el cociente entre la tensión en el hidrófono cuando está en circuito abierto y la presión acústica que incide sobre él, de acuerdo con la ecuación 73.

$$RVR = OCV = \frac{V}{P} [V/Pa] \quad (73)$$

De acuerdo con lo anterior se aprecia, que las unidades son [V/Pa], sin embargo, según los valores registrados pueden encontrarse igualmente [mV/Pa], o en las unidades antiguas [V/ $\mu$ bar]; para el caso que nos compete se expresaran en decibeles y por lo tanto es necesario considerar una sensibilidad de referencia para lo cual se tomara [V/ $\mu$ Pa], es decir dB ref. 1V/  $\mu$ Pa.

$$RVR(dB) = OCV(dB) = 10 \log_{10} \frac{V}{P}, \text{ ref } 1V/\mu Pa \quad (74)$$

Estos valores serán negativos, y entre más cercanos a cero sean, (mayor magnitud), más sensibles serán, permitiendo diferenciar de mejor manera entre dos valores cercanos de presión registrada del hidrófono.

### 3.1.2. Transmitting Voltage Response (TVR).

Este parámetro es la sensibilidad en Emisión, sirve para expresar la presión que se genera en el medio a una yarda de distancia Transductor en condiciones de campo libre, a partir de un determinado voltaje aplicado en los terminales del mismo. En consecuencia, corresponde al cociente de la presión dividido entre la diferencia de potencial que lo genero, tal como se puede ver en la ecuación 75.

$$TVR = \frac{P}{V} [Pa/V] \quad (75)$$

Como puede observarse en la ecuación 73, las unidades son [Pa/V], sin embargo, es normal trabajarlo con decibeles, tomando de referencia una sensibilidad al a transmisión de [1 $\mu$ Pa/V], por lo tanto:

$$TVR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P}{V}; ref 1 \mu Pa/V \quad (76)$$

A diferencia de la característica anterior, estos valores de sensibilidad son positivos y entre mayor lo sea, mejor su calidad; dado que permitirá con un mismo valor de voltaje transformar la señal eléctrica en una variación de presión acústica más alta.

### 3.1.3. Índice Directivo (DI).

Como ya se indicó en el capítulo 1, esta característica habla sobre la propiedad de concentrar en una dirección específica la intensidad del sonido en el caso de los transductor; o bien que define cual es la respuesta de un hidrófono ante ondas de presión que provienen de distintas direcciones.

Dicho comportamiento es presentado en diagramas polares (cortes verticales y horizontales), de acuerdo con Gómez Magenti (Gómez Magenti, 2016), existen tres tipos diagramas fundamentales del índice de Directividad, de acuerdo con la configuración geométrica de las celdas piezoeléctricas:

- **Diagrama Omnidireccional.** Su diagrama de radiación corresponde es una circunferencia y tienen una cobertura de 360°; captando igualmente las ondas acústicas provenientes de todas las direcciones.
- **Diagrama Bidireccional.** Tienen una cobertura de 90° en ambos ejes y son sensibles a las radiaciones sonoras provenientes de ángulos opuestos; es decir, su máxima sensibilidad se encuentra en los ángulos 0° y 180°, y su máximo rechazo en los ángulos 90° y 270°.
- **Diagramas Unidireccional.** Las celdas piezoeléctricas unidireccionales son aquellas más sensibles a las ondas sonoras provenientes de una dirección determinada. Por tanto, su máxima sensibilidad se encuentra en 0°

## 3.2. Características del Hidrófono RESON TC 4032.

Dicho de manera sencilla, los hidrófonos son un tipo de transductor que tienen como función captar las variaciones de presión en el agua y que son capaces de transformarla en una determinada tensión eléctrica.

A continuación, se realiza la transcripción de las especificaciones obtenidas de la ficha técnica facilitada por el fabricante:

*Tabla 2. Características del hidrófono RESON TC 4032*

<b>Característica técnica</b>	<b>Valores característicos</b>
Rango de frecuencia utilizable	5Hz a 120kHz
Rango de Frecuencia lineal	15Hz a 40kHz $\pm 2$ dB 10Hz a 80kHz $\pm 2.5$ dB
Sensibilidad en recepción RVR - OCV	-170dB re 1V/ $\mu$ Pa (-164 dB con salida diferencial)
Directividad horizontal (DI <sub>H</sub> )	Omnidireccional $\pm 2$ dB a 100kHz
Directividad vertical (DI <sub>V</sub> )	270° $\pm 2$ dB a 15kHz
Profundidad de operación	600m
Profundidad de supervivencia	700m
Rango de temperatura en operación	-2°C a +55°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-30°C a +70°C
Peso (en aire):	720g sin cable
Max. tensión de salida:	$\geq 3.5$ Vrms (a 12VDC)
Ganancia del Preamplificador	10dB
Alimentación de voltaje	12 a 24VDC
Filtro de paso alto:	7Hz -3dB
Corriente de suministro en reposo:	$\leq 19$ mA a 12VDC $\leq 22$ mA a 24VDC
Material de encapsulación:	NBR de fórmula especial
Material de la carcasa:	Alu Bronze AlCu10Ni5Fe4

De la misma manera la hoja técnica los diagramas de radiación vertical y horizontal del índice Directivo, los cuales son presentados en la figura 40.

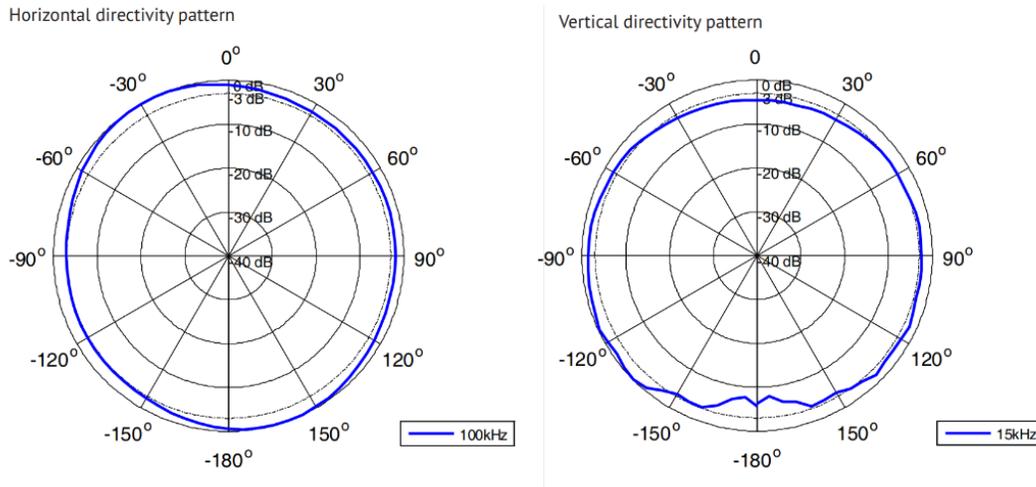
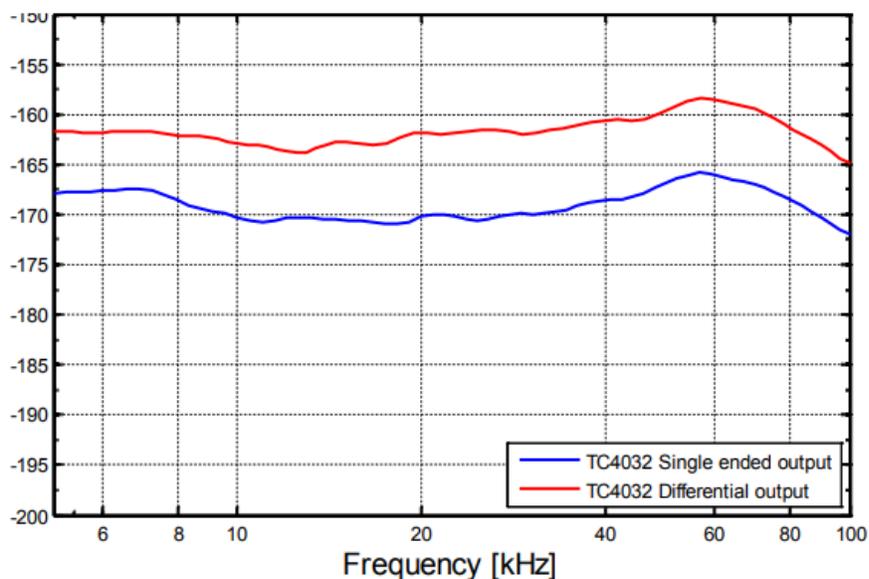


Figura 40. Diagramas de radiación horizontal y vertical del hidrófono RESON TC 4032.

(Fuente: Teledyne RESON)

Otra característica importante para resaltar en este hidrófono, es que posee un preamplificador internamente, cuya ganancia es de 10dB, además presenta una sensibilidad (RVR – OCV) de aproximadamente -170dB ref. 1V/ $\mu$ Pa a 1m. en un ancho de banda amplio 5-100KHz, tal como puede observarse en la figura 41.

## Receiving Sensitivity [dB re 1V/ $\mu$ Pa @ 1m]



The OCR curve shown above is for single output

Figura 41. Sensibilidad del hidrófono RESON TC 4032. Su valor es de -170dB ref. 1V/ $\mu$ Pa a un metro de separación, en un ancho de banda amplio 5-100KHz.

(Fuente: Teledyne RESON)

Otro factor no menos importante de indicar son las conexiones a realizar para colocarlo en operación, las cuales pueden ser observadas en la Figura 42.

Electrical Diagram

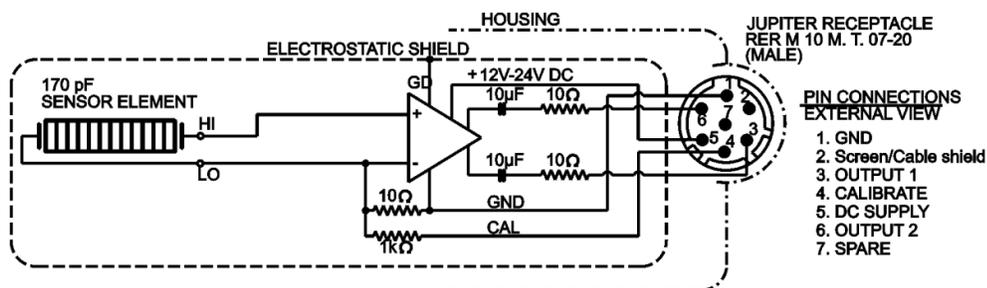


Figura 42. Terminales de conexión del hidrófono RESON TC 4032.

(Fuente: Teledyne RESON)

### 3.3. Características del Transductor Furuno.

Como se ha indicado en la introducción de este capítulo, de este dispositivo no se contaba con ningún dato técnico por lo cual se optó por realizar una serie de pruebas para establecer las principales características pertinentes para el proyecto, tales como:

- Ancho de banda disponible.
- Circuito equivalente, con el objetivo de observar su respuesta en frecuencia.
- Respuesta de voltaje en transmisión TVR o sensibilidad en transmisión.

#### 3.3.1. Métodos de calibración de Transductor.

Uno de los datos apremiante a encontrar del transductor era la Sensibilidad en transmisión TVR, que como ya se indicó anteriormente, radica en encontrar la presión a una distancia de 1 yarda (o 1m en el sistema SI), cuando se alimenta el transductor con una diferencia de potencia de 1v.

##### 3.3.1.1. Método de comparación directa.

Con este método se calibra la respuesta de voltaje del transductor Furuno, cuando es usado como transmisor (TVR), tomando como referencia los datos técnicos del hidrófono RESON TC 4032.

Como ya se indicó, la expresión para el cálculo TVR, es el cociente de la presión generada a una distancia de 1 yarda, entre la tensión de entrada igual a  $V_{in}=1V$ , expresando el resultado en dB ref.  $1\mu Pa/1$  a diferentes frecuencias, es decir:

$$TVR(f)_{dB} = 20 \log_{10} \frac{P_{1yd}}{V_{in}}, \text{ ref } 1\mu Pa/V \quad (77)$$

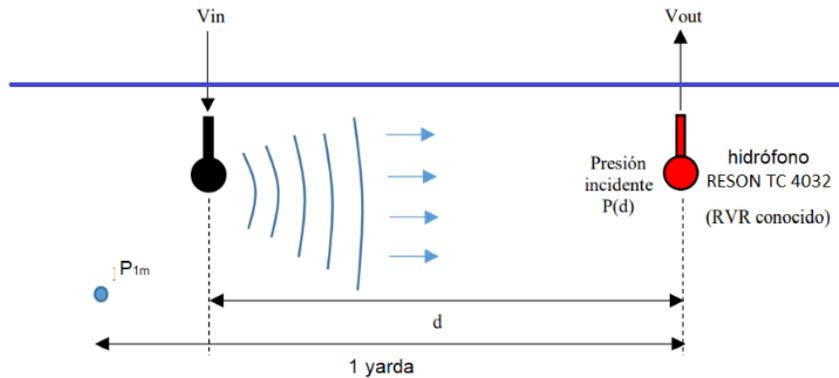


Figura 43. Montaje para determinar la característica TVR del Transductor Furuno a partir del valor RVR del hidrófono RESON TC 4032.

Fuente: Gómez, P. (2016). Estudio de la calibración de sensores acústicos por el método de reciprocidad para diferentes geometrías. Aplicación a la evolución temporal de la sensibilidad de los hidrófonos en instalaciones in situ. Universidad Politécnica de Valencia (España)

La metodología para realizar el cálculo del TVR del transductor Furuno es la siguiente:

**Paso 1:** Se alimenta el transductor con un Voltaje de  $V_{in}$  con una onda sinusoidal a una frecuencia  $f$  Hz.

**Paso 2:** Se realiza el registro de los valores de las tensiones  $V_{in}$  en el transductor y  $V_{out}$  en el hidrófono con su correspondiente valor de frecuencia.

**Paso 3:** Repita los pasos 1 a 2 un número de veces suficientes para cubrir el rango lineal de frecuencia del transductor.

**Paso 4:** Realizar los siguientes cálculos:

A la salida del hidrófono se tiene un voltaje  $V_{out}$ , por lo tanto, se debe cumplir:

$$RVR_{ref} = 20 \log_{10} \frac{V_{out}}{P_i(d,f)} \quad (78)$$

Donde  $P_i(d, f)$  corresponde al valor de la presión incidente en el hidrófono desde una distancia  $d$  y con una onda sinusoidal de frecuencia  $f$ (Hz).

Por lo tanto, se puede despejar el valor de potencia incidente:

$$\frac{V_{out}}{P_i(d, f)} = 10^{RVR_{ref}/20}$$

Concluyendo:

$$P_i(d, f) = V_{out} 10^{-RVR_{ref}/20} \quad (79)$$

Nota: La ecuación 79 permite encontrar cualquier valor de presión que incide sobre el hidrófono a partir de la tensión inducido en sus terminales.

**Paso 5:** Se encuentra el valor de la presión a una distancia  $d=1\text{yd}$  (o un metro en el sistema SI):

Ahora bien, esta presión a medida que se propaga, se debe ver afectada por el coeficiente de atenuación (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander, 2000), además, debe dispersarse a medida que se aleja de la fuente; por tanto, la misma presión puede ser representada en mismo punto mediante la expresión:

$$P(r) = \frac{P_o}{r} e^{-ar} \quad (80)$$

De esta ecuación se infiere, que dada las pequeñas longitudes a las que se realizan las medidas, experimentales en este estudio, es posible despreciar la atenuación, por lo tanto, para una distancia  $d(\text{yardas})$ , se obtiene igualando con 79:

$$P_i(d, f) = \frac{P_o}{d} = V_{out} 10^{-RVR_{ref}/20}$$

Despejando  $P_o$ , se concluye:

$$P_o = d \cdot V_{out} 10^{-RVR_{ref}/20} \quad (81)$$

A partir de 80 y 81, se consigue una expresión que permite realizar el cálculo de la presión en cualquier punto  $r$ :

$$P(r) = \frac{[d.V_{out}10^{-RVR_{ref}/20}]}{r} \quad (82)$$

Dado que para el cálculo de la característica TVR del Transductor se requiere la presión a una distancia de 1yd, se considera que las celdas piezoeléctricas se encuentran ubicadas a dicha distancia por lo tanto de 82 se obtiene:

$$P(1yd, f) = d.V_{out}10^{-RVR_{ref}/20} \times 1\mu Pa \quad (83)$$

**Paso 6:** Ya con el valor de presión a una yarda del Transductor, se procede a realizar el cálculo de la característica  $TVR_{ref}(f)$ , tal como se indica:

$$TVR_{ref}(f) = 20\log_{10} \left[ \frac{P(1yd, f)}{V_{in}} \right]$$

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$TVR_{ref}(f) = 20\log_{10} \left[ \frac{d.V_{out}10^{-RVR_{ref}/20}}{V_{in}} \right] \quad (84)$$

**Paso 7:** Una vez establecido del valor de la característica  $TVR_{ref}(f)$ , se puede obtener la expresión de variación de la presión a medida que se desplaza hacia el hidrófono:

$$P_{tranducer}(r) = \frac{P(1yd, f)}{r} e^{\frac{-\alpha(r-1)}{2}} \times 1\mu Pa ; \text{para } r \geq 1yd \quad (85)$$

Donde, en el caso de poseer el valor de  $TVR_{ref}$  la presión a una yarda, se puede encontrar mediante:

$$P(1yd) = V_{in}10^{TVR/20} \times 1\mu Pa \quad (86)$$

### 3.3.1.2. Obtención del parámetro TVR del transductor Furuno.

Para la obtención de este parámetro, valga decir de suma importancia para el proyecto, lo único que se debe hacer es seguir los pasos propuestos en el ítem anterior, por lo tanto, se procede de acuerdo a ellos:

**Paso 1:** Se realizó el montaje mostrado en las figuras 43 y 44, donde se alimentó el transductor con un Voltaje de  $V_{in}$ , con una onda sinusoidal a diferentes frecuencias.



Figura 44. Vista Frontal del montaje realizado para realizar calibración del transductor Furuno.

Fuente: propia.

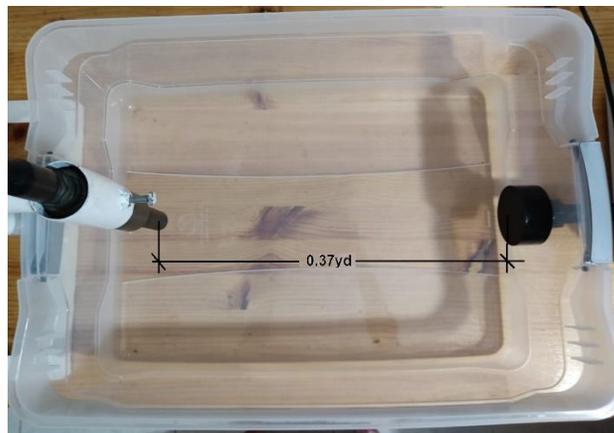


Figura 45. Vista superior del montaje realizado para realizar calibración del transductor Furuno, se observa que la distancia entre las celdas piezoeléctricas es de 0.37yd.

Fuente: Propia.

**Paso 2:** Se realiza el registro de los valores de las tensiones  $V_{in}$  en el transductor y  $V_{out}$  en el hidrófono con su correspondiente valor de frecuencia.

**Paso 3:** Se repitieron los pasos 1 a 2 un número de veces suficientes para cubrir el ancho de banda lineal de frecuencia del transductor; en este caso se busca un rango tal que comprendiera la frecuencia de resonancia. Esta información es presentada en la tabla 3.

*Tabla 3. Datos experimentales obtenidos en la aplicación del Método de comparación directa donde la distancia entre transductor e hidrófono es de 0.37yd (0.40m)*

f(KHZ)	Vin transductor	Vout hidrófono
44,17	0,78	0,20
45,90	0,76	0,40
46,18	0,73	0,20
47,63	0,73	0,77
48,95	0,73	0,48
49,78	0,62	0,50
50,68	0,71	0,93
51,23	0,76	0,82
52,37	0,76	0,57
53,24	0,74	0,43
54,00	0,76	0,42
55,28	0,77	0,40
56,28	0,78	0,24
57,51	0,77	0,25
58,66	0,77	0,25
59,63	0,77	0,25
60,32	0,77	0,25
61,67	0,77	0,11
62,17	0,78	0,10
63,85	0,77	0,15
64,51	0,78	0,10
65,06	0,78	0,12
66,44	0,78	0,12
67,44	0,78	0,11
70,71	0,78	0,14
71,20	0,78	0,11
72,27	0,78	0,12

73,66	0,78	0,12
74,66	0,78	0,14
75,16	0,78	0,11
76,84	0,78	0,11
80,54	0,79	0,13
85,16	0,78	0,11
90,15	0,78	0,16
95,23	0,78	0,11
97,02	0,78	0,17
98,46	0,78	0,16
99,69	0,78	0,23
100,86	0,78	0,16

El conjunto de pasos entre 4 y 6 se llevan a cabo mediante la ejecución de un programa realizado en Matlab, el cual puede ser consultado a continuación:

```
% =====
% Datos experimentales obtenidos del Circuito para el cálculo la característica
% Respuesta de Voltaje en Transmisión TVR del FURUNO
% Programa elaborado por Ing. William Ramón Cuadrado Cano
% Última actualización: 27/02/2021
% =====
clc, clear all, close all
% =====
% datos requeridos
d=0.37; % distancia entre Transductor e hidrófono
RVR=-170; % Respuesta de voltaje en Receptor de hidrófono
% =====
% Se abre hoja de datos en Excel
Nombre Archivo='CALCULO_TVR.xlsx';
hoja=1;
Rango ='A4:C21';
Datos = xlsread (Nombre_Archivo, hoja, Rango);
% Se obtienen los datos de:
% f: Frecuencia a de la fuente que alimenta el Furuno
% Vin: Tensión de alimentación del Furuno
% Vout: Tensión que se induce en el hidrófono
f=Datos (:1). *1000; % Se transformas a Hz
Vin=Datos (:2);
Vout=Datos (:3);
% =====
% inician los cálculos
% Calculo de presión incidente en cada una de las frecuencias
Pi_fd=Vout. *10. ^ (-RVR. /20);
Po=Pi_fd. *d;
TVR= (Po. /Vin);
semilogx (f./1000,20. *log10(TVR),'r','LineWidth', 3)
```

```

grid on
title ('Característica TVR del Transductor Furuno')
xlabel('f[KHz]'), ylabel ('TVR dB ref. 1\mu Pa/V')
% =====

```

Al finalizar la ejecución de este programa, se obtiene la gráfica del comportamiento de las características TVR del Transductor de Furuno, tal como puede apreciarse en la figura 46.

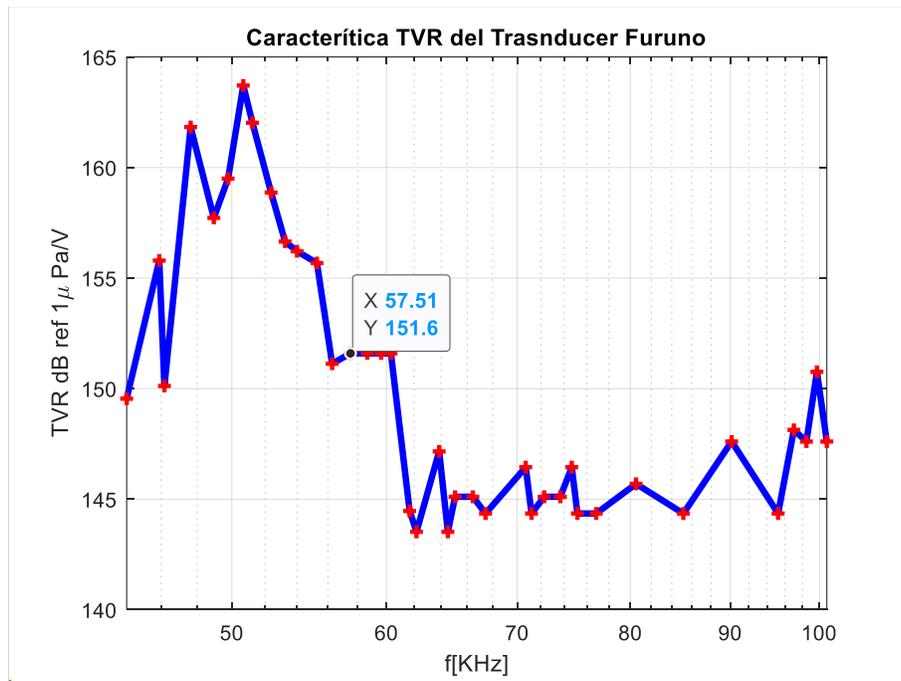


Figura 46. Representación de la característica TVR de Transductor Furuno.

Fuente: Propia.

### 3.3.2. Circuito equivalente del transductor.

Como ya se indicó en el capítulo 1, para este circuito equivalente se debe implementar dos circuitos auxiliares:

#### 3.3.2.1 Circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia $f_r$ .

Consistente en la conexión de un circuito serie: Generador de señales, resistencia  $R_1$  y la celda piezoeléctrica, tal como es presentado en la figura 47. Para el análisis del circuito se realiza la medida de valores de tensión RMS, a la salida del generador de señales y sobre la celda en estudio.

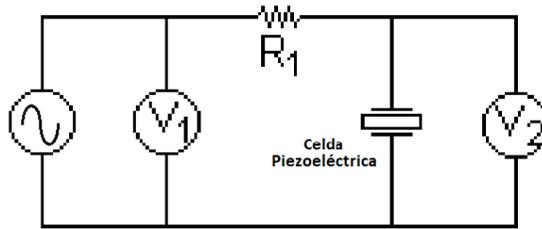


Figura 47. Circuito auxiliar para hallar la frecuencia de resonancia de la celda piezoeléctrica.  
Fuente: Propia

Al hacer variar la frecuencia del generador de señales, se encontrará un valor en el cual se genera una tensión mínima  $V_2$ , sobre la celda piezoeléctrica; ese valor de frecuencia es la frecuencia de resonancia  $f_r$  y el valor de la impedancia de la celda, será netamente resistivo, representada en el circuito de Van Dyke por la resistencia  $R_m$ . Su cálculo puede realizarse mediante la siguiente ecuación, obtenida al despejar  $R_m$ , luego de aplicar un divisor de tensión sobre la celda:

$$R_m = R_1 \frac{V_2}{V_1 - V_2} \quad (87)$$

Tomando en consideración esta metodología, se realizó el montaje del circuito mostrado en la Figura 47 y se realizaron tres mediciones de los valores pertinentes, de los cuales la medición 01 es presentada en la tabla 4.

Tabla 4. Datos experimentales obtenidos del Circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia  $f_r$ , donde el valor de  $R_1$  es de  $50\ \Omega$ , la frecuencia de resonancia  $f_r = 57.50\text{KHz}$ ,  $R_m = 12.66\ \Omega$ . (Fuente propia).

f(KHz)	V2(V)	V1(V)	Rm( $\Omega$ )	f(KHz)	V2(V)	V1(V)	Rm( $\Omega$ )
35,00	1,24	19,00	3,49	55,50	2,38	19,00	7,16
35,50	1,18	19,00	3,31	56,00	3,04	19,00	9,52
36,00	1,14	19,00	3,19	56,50	3,50	19,00	11,29
36,50	1,08	19,00	3,01	57,00	3,78	19,00	12,42
37,00	1,04	19,00	2,90	57,50	3,84	19,00	12,66
37,50	1,00	19,00	2,78	58,00	3,74	19,00	12,25
38,00	1,04	19,00	2,90	58,50	3,40	19,00	10,90
38,50	1,04	19,00	2,90	59,00	3,06	19,00	9,60

39,00	1,04	19,00	2,90	59,50	2,74	19,00	8,43
39,50	0,98	19,00	2,72	60,00	2,52	19,00	7,65
40,00	0,92	19,00	2,54	60,50	2,30	19,00	6,89
40,50	0,86	19,00	2,37	61,00	2,18	19,00	6,48
41,00	0,86	19,00	2,37	61,50	2,02	19,00	5,95
41,50	0,98	19,00	2,72	62,00	1,90	19,00	5,56
42,00	0,98	19,00	2,72	62,50	1,80	19,00	5,23
42,50	0,92	19,00	2,54	63,00	1,68	19,00	4,85
43,00	0,90	19,00	2,49	63,50	1,62	19,00	4,66
43,50	0,88	19,00	2,43	64,00	1,60	19,00	4,60
44,00	0,86	19,00	2,37	64,50	1,58	19,00	4,54
44,50	0,82	19,00	2,26	65,00	1,54	19,00	4,41
45,00	0,76	19,00	2,08	65,50	1,48	19,00	4,22
45,50	0,72	19,00	1,97	66,00	1,40	19,00	3,98
46,00	0,70	19,00	1,91	66,50	1,36	19,00	3,85
46,50	0,68	19,00	1,86	67,00	1,28	19,00	3,61
47,00	0,58	19,00	1,57	67,50	1,18	19,00	3,31
47,50	0,54	19,00	1,46	68,00	1,20	19,00	3,37
48,00	0,50	19,00	1,35	68,50	1,28	19,00	3,61
48,50	0,44	19,00	1,19	69,00	1,38	19,00	3,92
49,00	0,42	19,00	1,13	69,50	1,44	19,00	4,10
49,50	0,32	19,00	0,86	70,00	1,38	19,00	3,92
50,00	0,30	19,00	0,80	70,50	1,34	19,00	3,79
50,50	0,34	19,00	0,91	71,00	1,28	19,00	3,61
51,00	0,38	19,00	1,02	71,50	1,24	19,00	3,49
51,50	0,46	19,00	1,24	72,00	1,22	19,00	3,43

52,00	0,56	19,00	1,52	72,50	1,18	19,00	3,31
52,50	0,66	19,00	1,80	73,00	1,16	19,00	3,25
53,00	0,82	19,00	2,26	73,50	1,14	19,00	3,19
53,50	1,00	19,00	2,78	74,00	1,12	19,00	3,13
54,00	1,22	19,00	3,43	74,50	1,10	19,00	3,07
54,50	1,48	19,00	4,22	75,00	1,10	19,00	3,07
55,00	1,88	19,00	5,49				

De acuerdo como se establece en la metodología, al hacer variar la frecuencia del generador de señales, se encontrará un valor en el cual se genera una tensión mínima  $V_2$ , sobre la celda piezoeléctrica; ese valor de frecuencia es la frecuencia de resonancia  $f_r$  y el valor de la impedancia de la celda, será netamente resistivo, representada en el circuito de Van Dyke por la resistencia  $R_m$ . Por lo tanto, se procedió a elaborar la gráfica de dicha tensión versus la frecuencia, la cual puede observarse en la figura 48, se concluye que la frecuencia de resonancia tiene un valor de 57.5KHz mientras el valor de la resistencia de resonancia  $R_m$  es de 12.60 $\Omega$ .

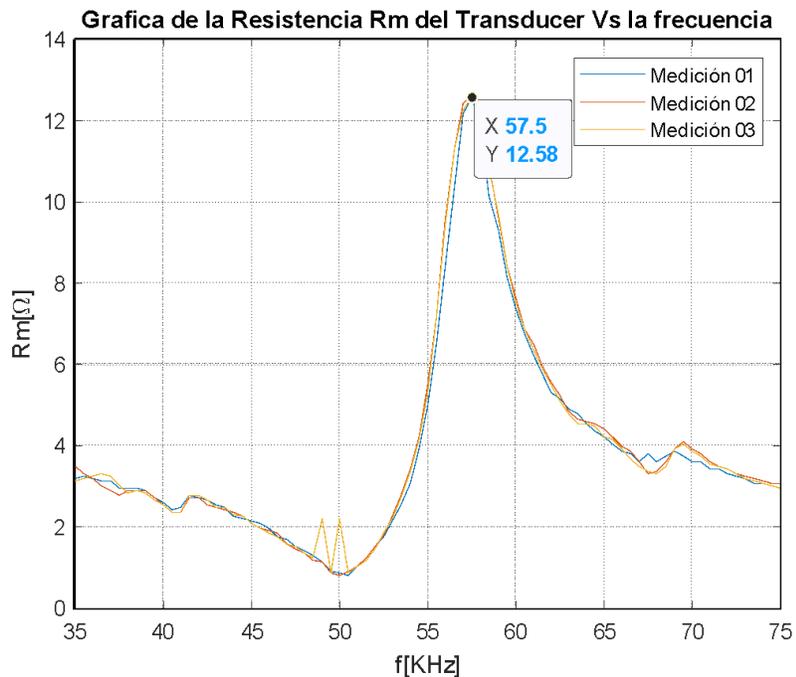


Figura 48. A partir el montaje de del circuito para el cálculo de la frecuencia de resonancia  $f_r$ , se encuentra que es de 57.5KHz,  $R_m=12.60\Omega$ .

Fuente: Propia.

### 3.3.2.2. Circuito para el cálculo de la frecuencia de anti resonancia $f_a$ .

Para este caso, nuevamente se realiza el montaje de los tres elementos en serie: Generador de señales, celda piezoeléctrica y una resistencia  $R_2$ . Tal como puede apreciarse en la figura 49. Para el análisis del circuito se realiza la medida de valores de tensión RMS, a la salida del generador de señales y sobre la resistencia  $R_2$ .

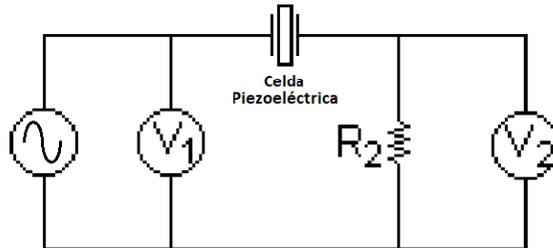


Figura 49. Circuito auxiliar para hallar la frecuencia anti resonancia de la celda piezoeléctrica.  
Fuente: Propia.

Dado que la frecuencia de resonancia  $f_a$  es aquella donde la celda adquiere el máximo valor de impedancia, al ir variando la frecuencia del generador de señales, se encontrará un valor de  $V_2$ , que será el mínimo de todos los valores medidos, como consecuencia se tendrá un máximo valor de tensión sobre la celda piezoeléctrica. En ese momento la frecuencia del generador de señales, será la frecuencia anti resonante  $f_a$ .

Es necesario medir el valor de la capacitancia de la celda piezoeléctrica para lo cual se utiliza una frecuencia inferior a la de resonancia, con el objetivo que los valores de  $R_m$  y la reactancia inductiva debido a  $L_m$ , sean despreciables. Dado que  $C_m$  y  $C_o$  quedaría en paralelo se cumpliría:

$$C_1 = C_o + C_m \quad (88)$$

El resto de los valores se obtendrían a partir de las siguientes ecuaciones de 89 a 92:

$$\frac{C_o}{C_m} = \frac{f_r^2}{f_a^2 - f_r^2} \quad (89)$$

$$L_m = \frac{1}{\omega_r^2 C_m} \quad (90)$$

$$C_m = \frac{C_1}{1 + \frac{C_o}{C_m}} \quad (91)$$

$$Q_m = \frac{1}{\omega_r \cdot C_m \cdot R_m} \quad (92)$$

De la misma manera anterior, a partir de la metodología propuesta se procedió a realizar el montaje del circuito presentado en la figura 48, donde la capacitancia C1 fue medida resultando un valor promedio de 26.58nF, realizando nuevamente tres mediciones obteniendo que la frecuencia de anti resonancia tiene un valor de 67.5KHz. Con estos valores se procede a realizar el cálculo del resto de parámetros del circuito equivalente de Van Dyke, Co, Cm y Lm, utilizando las ecuaciones de 89 a 92, valores presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Datos experimentales obtenidos del Circuito para el cálculo de la frecuencia de anti resonancia fa

Medición	Fr (KHz)	Fa (KHZ)	C1 (nF)	Cm (nF)	Lm (mH)	Co (nF)
01	57.50	67.5	25.98	7.13	1.08	18.85
02	57.50	67.5	26.39	7.24	1.06	19.15
03	57.50	67.5	27.38	7.51	1.02	19.86
<b>PROMEDIOS</b>	<b>57.50</b>	<b>67.5</b>	<b>26.58</b>	<b>7.29</b>	<b>1.05</b>	<b>19.29</b>

Todos estos cálculos permiten concluir con el circuito equivalente es el mostrado en la figura 50.

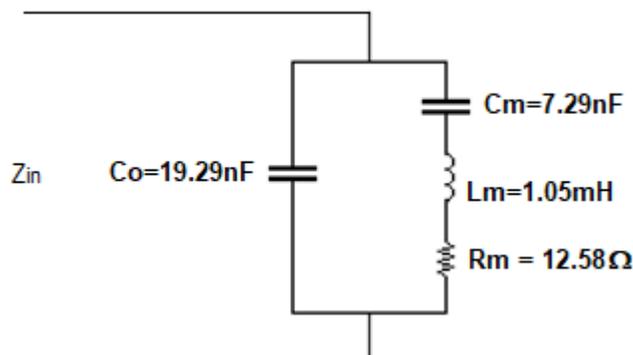


Figura 50. Circuito equivalente de Van Dyke, para el Transductor Furuno.

Fuente: Propia.

En La figura 51, se presenta la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia, donde pueden apreciarse el comportamiento de la misma en las frecuencias de resonancia y anti-resonancia.

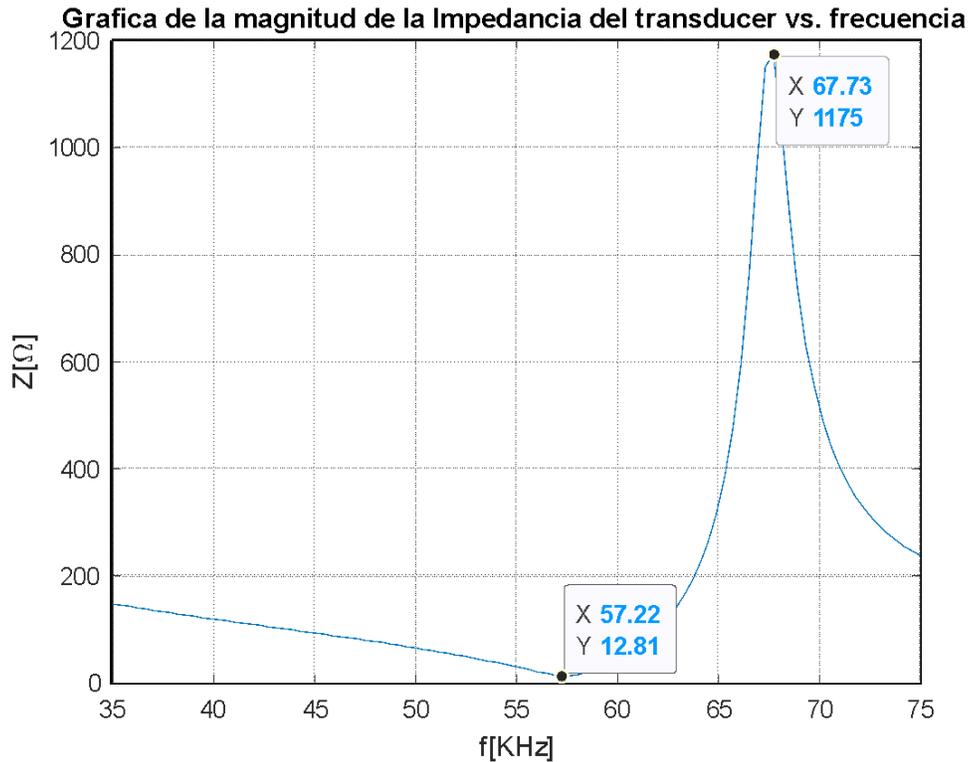


Figura 51. Comportamiento de la impedancia del transductor al variar la frecuencia.

Fuente: Propia.

Finalmente se ha utilizado el valor de la impedancia para realizar el cálculo de la potencia que una fuente de tensión de valor 1 voltio RMS, entregaría al Transductor, se observa en la figura 52 como la máxima transferencia se dará en la frecuencia de resonancia y su ancho de banda a -3dB, será aproximadamente:

$$B(KHz) = (56.54 - 58.46)KHz = 1920HZ \quad (93)$$

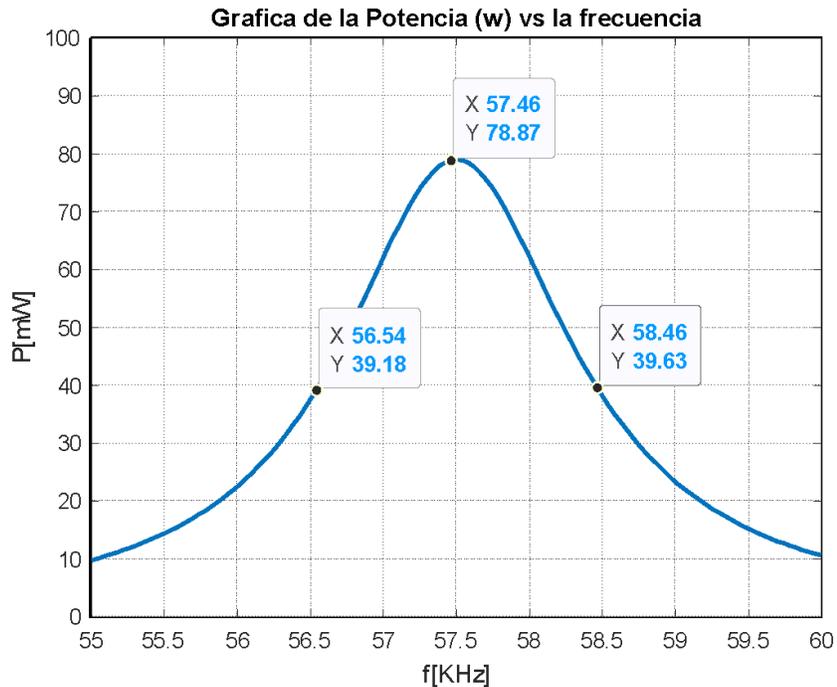


Figura 52. La máxima transferencia de potencia en el transductor ocurre en la frecuencia de resonancia  $f_r = 57.50\text{kHz}$  y con ancho de banda de  $1920\text{Hz}$ . Tomando como referencia  $1\text{V}$ .

Fuente: Propia.

### 3.4. Resumen del capítulo.

En este ítem se realizará un resumen de las principales conclusiones obtenidas a lo largo de este capítulo con respecto al Transductor al hidrófono y al acceso al canal acústico submarino y que son de importancia al momento de realizar la simulación del canal.

- **Frecuencia de operación Transduce:** La frecuencia de resonancia es de  $57.50\text{kHz}$  y posee un ancho de banda  $1920\text{Hz}$ , este es el rango ideal para trabajar.
- **Frecuencia de operación de hidrófono:** Todo el rango entre  $10\text{Hz}$  a  $80\text{kHz}$   $\pm 2.5\text{dB}$ , el hidrófono posee una característica RVR aproximadamente plana, sin embargo, por lo tanto, es el rango de operación adecuado, sin embargo, para efectos de proyecto solo será utilizado el ancho de banda del Transductor.

- **Cálculo de la Tensión sobre el Transductor:** Si se desea obtener la máxima transferencia de potencia sobre el Transductor en el momento de alimentarlo, este se debe hacer trabajar en la frecuencia de resonancia, en cuyo caso la resistencia de la fuente deberá tener un valor tal que sea lo más cercano posible al valor que adquiere la impedancia del transductor en ese momento de la resonancia, es decir  $12.60\Omega$ . Por lo tanto, para el cálculo del voltaje sobre el Transductor se tendrá el siguiente circuito equivalente que es presentado en la figura 53.

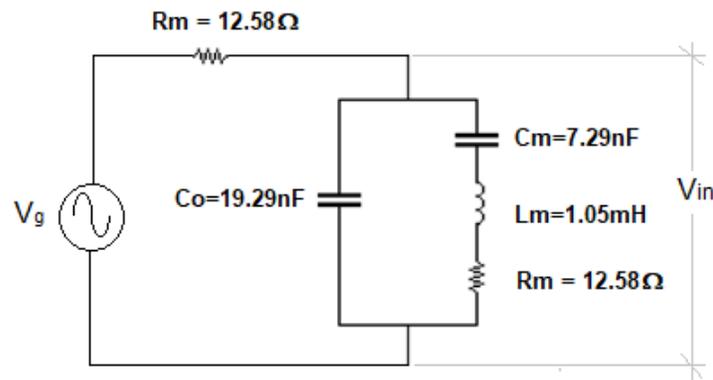


Figura 53. Circuito equivalente del transductor conectado a una fuente de tensión, con el objeto de conseguir la máxima transferencia de potencia en el momento de trabajar en la frecuencia de resonancia.

Fuente: Propia.

- **Expresión para transformar tensión en el transductor en presión en el canal:** De acuerdo con lo estudiado, en el primer capítulo y en el presente, esta expresión se obtiene a partir del parámetro  $TVR(f)$ , es decir:

$$TVR(f) = 20 \log_{10} \left[ \frac{P(f, 1yd)}{V_{in}} \middle/ \frac{1\mu Pa}{V} \right] \text{ref } 1\mu Pa/V$$

Por lo tanto, la presión a una distancia de 1yd, debido a una tensión  $V_{in}$ , tendrá un valor de:

$$P(f, 1yd) = V_{in} \cdot 10^{\frac{TVR}{20}} \times \frac{\mu Pa}{V} \quad (94)$$

- **Expresión de la Presión en su desplazamiento por el canal:** A partir de una yarda se tiene la siguiente ecuación analítica.

$$P(f, r) = \frac{P(f, 1yd)}{r} e^{-\alpha(r-1)} \mu Pa$$

Esta expresión permite ingresar al canal, colocando una presión a una yarda a una celda omnidireccional; ahora debe ser transformada a partir de las expresiones que fueron estudiadas y resumidas en la ecuación 70:

$$(171.5 + 10 \log_{10} Pot + DI_{tx} + E) - (k10 \log_{10} r + \alpha \times r \times 10^{-3}) - (NL - DI_{rx}) > DT$$

Se debe tener presente, que esta ecuación realiza el cálculo del cociente de la intensidad de la señal sobre la intensidad del ruido, tomando en consideración únicamente la intensidad que penetra al canal, en forma de presión, se obtiene:

$$I \left[ \frac{W}{yd^2} \right] = \frac{P^2(f, 1yd)}{\rho c} \times \frac{DI_{tx} \cdot DI_{rx}}{r^{2k}} \cdot e^{\frac{-2\alpha(r-1) \times 10^{-3}}{8.69}}$$

Sacando la raíz cuadrada para obtener la presión:

$$P(r) = \frac{P(f, 1yd)}{r^k} \cdot \sqrt{DI_{tx} \cdot DI_{rx}} \cdot e^{\frac{-\alpha(r-1) \times 10^{-3}}{8.69}} \mu Pa \quad (95)$$

Donde:

P: Corresponde al valor de la presión a una distancia r(yd) desde el transductor.

P(f, 1yd): Valor de la Presión a una 1 yd, medida desde el transductor expresado en  $\mu Pa$ . Este valor es calculado a partir del voltaje de alimentación y la característica TVR del mismo.

$r^k$ : Distancia entre transductor e hidrófono en yardas; donde k corresponde a geometría del frente de onda, siendo k=1, para geometría cilíndrica y k=2 cuando es esférica.

$DI_{tx}$ : Índice directivo del transductor adimensional.

$DI_{rx}$ : Índice directivo del hidrófono adimensional.

$\alpha$ : Índice de absorción, dB/Kyd; en este caso, cuando r se expresa en yarda, es necesario usar el valor  $10^{-3}$ , sin embargo, de r entra en Kyd, debe ser eliminado.

- **Expresión para convertir la Presión que incide en el hidrófono en tensión en bornes:** A partir de la característica RVR(f), se obtiene:

$$RVR(f) = 20 \log_{10} \left( \frac{\frac{V_{out}}{P(f)}}{\frac{V}{1 \mu Pa}} \right) \text{ ref } V/1 \mu Pa$$

Por lo tanto, el voltaje que se induce en los terminales del hidrófono cuando incide una onda de presión sonora en su superficie activa, viene dada por:

$$V_{out} = P(f) \cdot 10^{\frac{RVR}{20}} \cdot \frac{V}{\mu Pa} \quad (96)$$

## **Capítulo 4: Simulación del fenómeno de propagación de las ondas sonora en la capa superficial en la bahía interna de la ciudad de Cartagena.**

En capítulos anteriores nos dedicamos a recabar, la conceptualización mínima y necesaria sobre el comportamiento de las ondas sonoras en un medio acuático, y la influencia que tiene sobre estas ondas, la salinidad y las variaciones de la temperatura a medida que aumenta la profundidad; además se realizó un estudio de las celdas piezoeléctricas, elementos claves para poder ingresar y salir al medio marino, desembocando al final del capítulo 3, en un resumen sobre las expresiones analíticas y condiciones de fronteras que permitirán ingresar, recorrer y salir el canal en cuestión.

Ahora es oportuno, definir una serie de condiciones iniciales para dar inicio a la simulación del canal acústico submarino en la capa superficial en la bahía de Cartagena.

### **4.1 Condiciones bajo las cuales se realiza la simulación.**

El comportamiento del canal acústico submarino es similar al canal RF, en el hecho de que su ecuación de onda indica que, para poder transportar una perturbación de un punto a otro en el mismo canal, es necesario utilizar una fuente que varíe con el tiempo (Veloso Alarcón , 2007).

Como consecuencia a lo anterior, si se desea realizar una transmisión de una información proveniente de un sistema digital a través del canal, se deberá buscar la forma de convertir esta señal digital en otro tipo de señal armónica y dar por sentado que existe una relación entre los códigos digitales y los armónicos; esta es precisamente la tarea de las modulaciones digitales.

Por otro lado, al igual que en los sistemas de comunicaciones RF, se cuenta con un dispositivo que permite acoplar las señales eléctricas a las características del medio, consiguiendo transferir al canal la máxima transferencia de potencia como es el caso de las antenas; en la implementación de los sistemas de comunicaciones acústicas submarinas esta tarea la desempeña los elementos piezoeléctricos

(Transductor/Hidrófono), cuyo objetivo de transformar señales eléctricas a ondas de presión o viceversa (Borda García & Mendoza Valero, 2019).

En este orden de ideas, el diagrama de bloques se será implementado en las simulaciones sobre el canal es el mostrado en la figura 53, en él se operacionalizan estos dos conceptos, se modula la señal digital para poder contar con una señal que varíe con el tiempo y luego se inyecta esta señal a un transductor, el cual acopla la señal al canal acústico submarino, provocando la perturbación necesaria para transportar la información. Al atravesar el canal, el hidrófono percibirá la presión y la transformará en una señal de tensión armónica que luego será demodulada (Uribe Gómez & Vélez Hurtado, 2017).

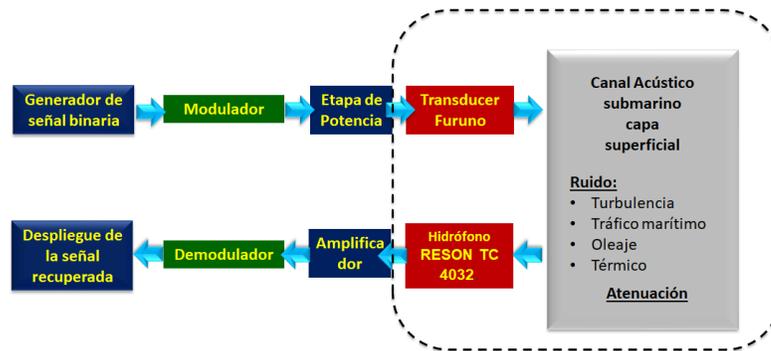


Figura 54. Se presenta el diagrama de bloques de la simulación.

Fuente: propia.

- Ambas celdas piezoeléctricas, transductor e hidrófono, serán ubicados a la misma profundidad  $h$  cuya unidad debe ser el pie.
- Ahora veamos las implicaciones que trae consigo, haber seleccionado la capa superficial de la bahía de Cartagena; el hecho de tratarse de aguas poco profundas, donde la acción de los fenómenos atmosféricos hacen que las masas de aguas se mezclen debido al oleaje producidos por los vientos que atacan la superficie del mar, causan que los valores de salinidad y temperatura sean prácticamente constantes para la columna de agua y por lo tanto la velocidad del sonido solo presenta variaciones leves debido a la poca profundidad existente (Aparicio, García Nuñez, Jiménez Martín, & Álvarez, 2010).
- Habría que decir también, que se considera propagación en espacio libre, es decir las ondas se propagaran sin tomar en consideración obstáculos como peces, accidentes en la batimetría del fondo del mar.

- Por otro lado, será considerada la dispersión geométrica, considerando los siguientes casos:
  - I. Geometría cilíndrica, considerada en propagaciones a larga distancia en entornos de aguas muy poco profundas, es decir, cuando la distancia  $r$  es mucho mayor que la profundidad  $h$ .
  - II. Geometría esférica, considerada en aguas profundas, en condiciones de espacio libre, donde la superficie del mar y el fondo del océano se encuentran distante de la ubicación del transductor. Es normal tomar como condición para su aplicación contar con  $r \gg h$ .
- Se aludió antes, en el capítulo No 1, al cálculo del coeficiente de absorción, para lo cual fue utilizada la expresión empírica denominada Ecuación de Thorp (Urick, 1983), permite el cálculo del coeficiente de absorción  $\alpha$ , en función de la frecuencia para el caso del océano ver la figura 25.

$$\alpha(dB/Kyd) = \frac{0.1 f^2}{1 + f^2} + \frac{40f^2}{4100 + f^2} + 2,75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003$$

Donde:

f: Corresponde a la frecuencia en KHz de la onda sonora.

Esta expresión, nos permitirá realizar el cálculo de la atenuación que presenta el canal acústico submarino a paso de la presión sonora, tal como será visto más adelante.

- Todavía hay algo más que añadir, y es con respecto al ruido ambiental o ruido de fondo, para lo cual serán simulados los cuatro casos considerados en el capítulo No 1 a saber:
  - I. Ruido debido al oleaje, en relación directa con el viento en la superficie del mar.
  - II. Ruido debido a la Turbulencia de las aguas.
  - III. Ruido térmico.
  - IV. Ruido debido al tráfico marítimo.
- De acuerdo con el estudio realizado al Transductor Furuno, se concluyó que la frecuencia ideal para ser utilizado como transmisor es de 57.50KHz, con un ancho de banda de 1.920Hz. Por otro lado, el valor de su característica TVR a la misma frecuencia es de 151.60dB ref. 1 $\mu$ Pa

- Con respecto a la simulación serán utilizados modulaciones digitales ASK y FSK,
- La evaluación del sistema será a partir del cálculo de la BER, en todos los casos.

## 4.2 Instrumentos para la simulación.

La simulación ha sido realizada en el programa de Simulink, que hace parte de la herramienta de Matlab; para aprovechar todas las funciones realizadas durante el desarrollo del proyecto, aquellas fueron implementadas con el comando Function Matlab, de acuerdo con el programador de funciones S-Function (VALENCIA, 2013) y además, se hizo uso de la función workspace, acuerdo con las instrucciones encontradas en la lista de videos Simulink desde cero, por Sergio A. Castaño (Castaño Giraldo , 2020), con el propósito de lograr compartir los potentes recursos de Matlab en el área de operación de simulink y viceversa.

### 4.2.1 Entradas y salidas y tránsito en el canal.

Lo que interesa en este momento es aclarar cómo se entrará, transitará y finalmente saldrá del canal acústico submarino la señal con la información; por otro lado, la señal se verá enrarecida por la presencia del ruido ambiental, la dispersión geométrica y la absorción del medio.

**4.2.1.1. Ecuación para entrar al Canal acústico submarino:** Cabe señalar, que parte de la solución de este cuestionamiento ya se resolvió al finalizar el capítulo tres donde se indicó que para ingresar al canal se requiere la característica TVR del Transductor, para lo cual se definió la ecuación:

$$P(f, 1yd) = V_{in} \cdot 10^{TVR/20} \times \frac{1\mu Pa}{v}$$

Primero debe ser calculado el voltaje de entrada con un divisor de tensión, sobre la impedancia de entrada, tal como se presenta en la figura 52. La función para desarrollar este trabajo es el siguiente:

```
function Vin=Ventrada(Vg,f)
% Vin=Ventrada(Vg,f)
% Vg: Valor de la Tensión de alimentación al transductor.
% f: Frecuencia de la fuente en KHz
% Función para realizar el cálculo del voltaje de entrada al
```

```

% transductor. Se deben ingresar los parámetros del mismo
% Elementos de calculados del circuito de Van Dyke
% =====
f=f.*1e3; % Se transforma la frecuencia a Hz.
Co=19.29e-9;
Cm=7.29e-9;
Lm=1.05e-3;
Rm=12.58;
% Cálculo del valor de la impedancia
w=2.*pi.*f;
XCo=1./(j.*w.*Co);
XCm=1./(j.*w.*Cm);
XLm=j.*w.*Lm;
Zs=XCm+XLm+Rm;
Ztrans=Zs.*XCo./(Zs+XCo);
% Cálculo del valor de la tensión de entrada al transductor.
Vin=abs(Vg.*Ztrans./(Rm+Ztrans));

```

A continuación, se presenta la función que permite entrar la señal al canal:

```

function Pin=CAentra(Vin,TVR)
% function Pin=CAentra(Vin,TVR)
% Esta función realiza el cálculo de la presión en micro Pa
% a una distancia de r=1yarda
% Vin: Alimentación del transductor por parte del modulador digital
% TVR: Respuesta de Voltaje como transmisor del transductor
% =====
Pin=Vin.*10.^(TVR./20).*1e-6;

```

**4.2.1.2. Ecuación para Salir del Canal acústico submarino:** Cabe señalar, que parte De manera semejante, se indicó que, para poder salir del canal, se requiere conocer y hacer uso de la característica RVR; para lo cual se presentó la expresión:

$$V_{out} = P(f). 10^{RVR/20}$$

A continuación, se presenta la función que permite salir del al canal:

```

function Vout=CAsalida(Pr,RVR)
% function Vout=CAsalida(Pr,RVR)
% Esta función recupera la señal del canal
% Vout: Voltaje a la salida del hidrófono
% Pr: Presión que llega al hidrófono en microPa
% RVR: Respuesta de voltaje como receptor
Vout=Pr.*10.^( RVR./20);

```

**4.2.1.1. Ecuación para transitar en el Canal acústico submarino:** Este problema planteado requiere observar cómo afectar la señal de presión, una vez permanece un tiempo  $\Delta t(s)$  en transito en el canal; para este análisis recuperemos la expresión

presentada en el capítulo 3, la cual fue enumerada como ecuación 95 (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander, 2000):

$$P(r) = \frac{P(f, 1yd)}{r^k} \cdot \sqrt{DI_{tx} \cdot DI_{rx}} \cdot e^{\frac{-\alpha(r-1) \times 10^{-3}}{8.69}} \mu Pa \quad (95)$$

A continuación, se presenta la función encargada de dar tránsito a través del canal; como puede verse aplica el coeficiente de absorción y la divergencia geométrica correspondiente.

De acuerdo a lo presentado en la ecuación (95), con anticipación deben ser calculados los valores de los índices de Directivos de ambas celdas, para lo cual, se procede como se presenta a continuación:

Para la realización del cálculo de la Velocidad del sonido en el medio acuático submarino, se realizó de acuerdo con la expresión de Medwin, H (Tabla 1); por otro lado, para obtener los valores de temperatura y salinidad, han sido consideradas las expresiones obtenidas en el capítulo 2, a partir de la regresión de los valores experimentales presentados en dicho ítem (ecuaciones 71 – 72).

```
function C=Cavelocidad(h)
% function C=Velocidad(h)
% Función para realizar el cálculo de la velocidad del sonido
% para lo cual se utiliza la expresión de Medwin, H
% h: Profundidad de las celdas Piezo eléctricas en pies
% =====
h=h.*0.305; % se convierte de pies a metros
% Cálculo de la Temperatura Ecuación 71
T=-0.0002.*h.^3+0.0093.*h.^2-0.2005.*h+29;
% Cálculo de la Salinidad Ecuación 72
S=0.0008.*h.^3-0.0497.*h.^2+0.9409.*h+32.47;
% cálculo de la Velocidad
% Nota: Esta expresión es válida para:
% =====
%0<T<35°C; 0<S<45ppm ; 0<Z<1000m
% Desarrollo
Z=h; % Cambio de variable
if (T>=0)&(T<=35)
    if (S>=0)&(S<=45)
        if (Z>=0)&(Z<=1000)
            C=1449.9+4.6.*T-5.5e-2.*T.^2+2.9e-4.*T.^3+(1.34-1e-2.*T).*(S-35);
            C=C+1.6e-2.*Z;
        else
            disp('El valor de Z, está fuera de rango')
        end
    else
        disp('El valor de S, está fuera del rango')
    end
else
    disp('El valor de T, está fuera de rango')
```

end

Una vez obtenida la velocidad se procede con la obtención de los índices directivos de ambas celdas:

Para el caso del Transductor, se obtiene mediante la siguiente función

```
function Dltx=Dltransducer(C,f,a)
% Dltx=Dltransducer(C,f,a)
% Esta función realiza el cálculo del índice directivo del transductor
% Dltx: Índice de Directividad del transmisor
% C: Velocidad del sonido
% f: Frecuencia en kHz
% a: radio del pistón circular en m
% =====
f=f.*1e3; % se convierte la frecuencia a Hz
% Calculo del índice directivo del transductor
Dltx=10.*log10((2.*pi*a.*f./C).^2);
```

Para el caso del hidrófono, su cálculo se realiza como sigue:

```
function Dlr=Dlhidrofono(C,f,L)
% function function Dlr=Dlhidrofono(C,f,L)
% Esta función realiza el cálculo del índice de directividad
% del hidrófono
% Dlr: Índice de Directividad del receptor
% C: Velocidad del sonido
% f: frecuencia en KHz
% L: Es la longitud del hidrófono lineal en metros
% =====
f=f.*1e3; % se convierte la frecuencia a Hz
% Calculo del índice Directivo
Dlr=10.*log10(2.*L.*f./C);
```

Con respecto al cálculo del índice de absorción se tiene:

$$\alpha(dB/Kyd) = \frac{0.1 f^2}{1 + f^2} + \frac{40 f^2}{4100 + f^2} + 2,75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003$$

```
function alfa=TLabsorcion(f)
% alfa=TLabsorcion(f)
% Esta función realiza el cálculo del coeficiente de absorción mediante la
% aplicación de la Ecuación de Thorp.
% alfa: Es el coeficiente de absorción en dB/kyd
% f: frecuencia en KHz.
alfa=0.1.*f.^2./(1+f.^2)+40.*f.^2./(4100+f.^2)+2.75e-4.*f.^2+0.003;
```

Por otro lado, se debe recordar que este coeficiente varío con la profundidad; en el capítulo 1, se presentó la expresión que permite realizar la corrección, donde se aclara que h debe estar expresado en pies:

$$\alpha_d(\text{dB/Kyd}) = \alpha_o(1 - 1.93 \times 10^{-5}h)$$

La función para la realización de esta corrección se presenta a continuación:

```
function alfad=TLabsorcio_d(alfa,h)
% alfad=TLabsorcio_d(alfa,d)
% Esta función modifica el coeficiente de absorción con la profundidad a
% partir del coeficiente de absorción en la superficie.
% h: profundidad en pies
% alfa: coeficiente de absorción superficial en dB/kyd
% alfad: coeficiente de absorción a la profundidad d en dB/kyd
alfad=alfa.*(1-1.93e-5.*h);
```

Finalmente se procede con el cálculo de presión a una distancia r(yarda) distante del Transductor, tal como es presentado en la siguiente función:

$$P(r) = \frac{P(f, 1yd)}{r^k} \cdot \sqrt{DI_{tx} \cdot DI_{rx}} \cdot e^{\frac{-\alpha(r-1) \times 10^{-3}}{8.69}} \mu Pa$$

```
function Pr=CAtransito(Pin,r,h,alfa,Dltx,Dlrx)
% Pr=CAtransito(Pin,r,h,alfa,Dltx,Dlrx)
% Esta función permite realizar el tránsito de presión
% En el canal acústico submarino.
% Pr: Presión a una distancia r del transductor en micro Pascal
% Pin: Presión micro Pa a una yarda del transductor
% r: Es la separación entre transductor e hidrófono en yardas
% h: Es la profundidad del transductor en pies
% alfa: Índice de absorción en dB/Kyardas
% Dltx: Índice directivo del transductor en dB
% Dlrx: Índice directivo del hidrófono en dB
if r>=h
    k=1; % es cilíndrico
else
    k=2; % es esférico
end
Dltx=10.^(Dltx./10); % Se convierte a unidades reales
Dlrx=10.^(Dlrx./10); % Se convierte a unidades reales
Pr=(Pin./r.^k).*sqrt(Dltx.*Dlrx);
Pr=Pr.*exp(-alfa.*((r-1).*1e-3)/8.69);
```

La figura 54, muestra como estas tres funciones han sido implementadas en el código de simulink de Matlab; se aprecia cómo se integran con otros bloques como son el que Genera el ruido ambiental el índice de absorción y la dispersión.

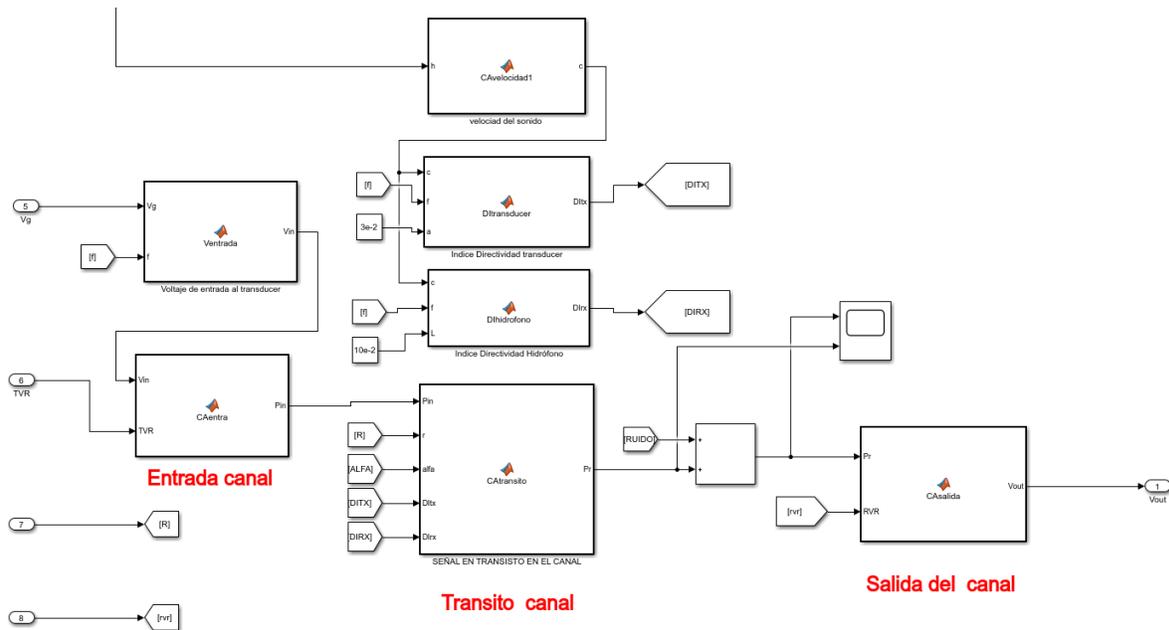


Figura 55. Implementación de las funciones Entrada, tránsito y salida del canal mediante un código simulink de Matlab.  
Fuente: Propia.

## 4.2.2 Introducción del ruido ambiental y la atenuación de la señal.

Al llegar aquí se debe recordar los conceptos vistos en el capítulo 1, pertinentes al Ruido ambiental, allí se presentaron sus definiciones y las ecuaciones con las cuales pueden ser calculadas sus intensidades en cada caso; agregado a lo anterior se presentan las diferentes funciones en código Matlab que permite realizar los bloque en el programa simulink correspondiente:

### 4.2.2.1. Ruido por la Turbulencia:

$$N_t(f)_{dB} = 17 - 30 \log_{10} f ; ref 1 \mu Pa/Hz$$

```
function Nt=Nturbulencia(f)
% función Nt=Nturbulencia(f)
% Calculo del ruido por Turbulencia,
% la frecuencia debe entrar en KHz
Nt=17-30.*log10(f);
```

#### 4.2.2.2. Ruido debido al Tráfico marítimo:

$$N_s(f)_{dB} = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log_{10}f - 60\log_{10}(f + 0.03); \text{ref } 1\mu\text{Pa/Hz}$$

Donde s es el factor de factor de tráfico marítimo, donde s=0 corresponde a tráfico bajo, s=0.5 es tráfico medio y s=1 es tráfico intenso respectivamente.

```
function Ns=Ntrafico(f,s)
% función Ns=Ntrafico(f,s)
% Función para realiza el cálculo del Ruido Ambiental debido al Trafico
% marítimo
% s: 0/0.5/1 trafico: ligero/moderado/intenso
Ns=40+20.*(s-0.5)+26.*log10(f)-60.*log10(f+0.03);
```

#### 4.2.2.3. Ruido por el Oleaje producido por el viento en la superficie:

$$N_w(f)_{dB} = 50 + 7.5w^{\frac{1}{2}} + 20\log_{10}f - 40\log_{10}(f + 0.4); \text{ref } 1\mu\text{Pa/Hz}$$

Este ruido se modela con el parámetro w, que corresponde con la velocidad del viento expresada en m/s.

```
function Nw=Noleaje(f,w)
% function Nw=Noleaje(f,w)
% Función para calcular el ruido ambiental debido al oleaje
% f: frecuencia en KHz
% W: velocidad del viento en m/s
Nw=50+7.5.*sqrt(w)+20.*log10(f)-40.*log10(f+0.4);
```

#### 4.2.2.4. Ruido térmico:

$$N_{th}(f)_{dB} = -15 + 20\log_{10}f; \text{ref } 1\mu\text{Pa/Hz}$$

```
function Nth=Ntermico(f)
%function Nth=Ntermico(f)
% Esta función realiza el cálculo del ruido Ambiental Térmico
% f: Es la Frecuencia em KHz
Nth= -15+20.*log10(f);
```

**4.2.2.5. Ruido Ambiental:** El ruido ambiental total se calcula entonces como la contribución de todos estos subcomponentes:

$$NL(f)_{dB} = N_t(f)_{dB} + N_s(f)_{dB} + N_w(f)_{dB} + N_{th}(f)_{dB}$$

Estos valores de ruido están expresados con dB ref. 1μPa, y ancho de banda de 1Hz; por otro lado, la frecuencia debe ingresar a las expresiones en KHz.

Antes de culminar este proceso, a de observarse el hecho de que el ruido en realidad corresponden a un valor de Intensidad, sin embargo en el canal lo que viene haciendo transito es una señal de presión, por lo cual, ante de sumarlo, es necesario convertirlo a presión, por lo tanto se recurre a la siguiente función:

```
function Nt=NUireal(N)
% Esta función hace tres tareas
% 1. Convierte la Intensidad de Ruido a valores de unidades reales
% 2. Transforma la Intensidad en valores de presión
% 3. Introduce la aleatoriedad al ruido
% N: Corresponde al Ruido total
Nt=10.^(N./10).*1e-6;
Nt=sqrt(Nt.*1.54e6);
Nt=Nt.*rand;
```

El bloque que realiza el cálculo ruido ambiental, descrito anteriormente, quedaría tal como es presentado en la figura 55.

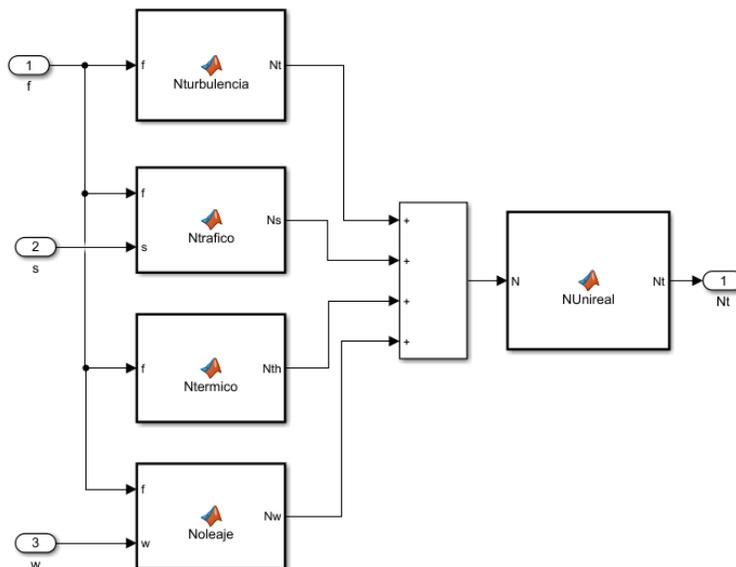


Figura 56. Se presenta el bloque que realiza el cálculo del ruido ambiental en el canal acústico submarino. Fuente: propia.

Queda por añadir entonces, el cálculo de la atenuación, que como se indicó en el capítulo 1, se divide en dos factores: el primero correspondiente a la divergencia geométrica y el segundo corresponde a la absorción del medio en el cual se propaga

la onda de presión sonora; ambos ya calculados en el proceso de presión de salida del canal. (Ítem 4.2.1. Entradas y salidas y tránsito en el canal).

Al integrar el bloque de Ruido ambiental y el cálculo del Índice de absorción, se conforma el subsistema en simulink tal como se cómo se presenta en la figura 56.

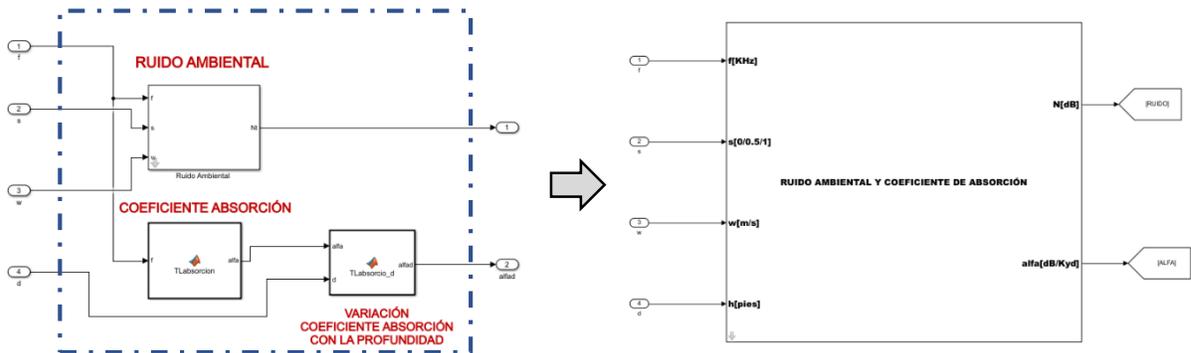


Figura 57. Bloques en simulink que integra el ruido ambiental y el índice de absorción.

Fuente: Propia

### 4.2.3. Modelo del canal acústico submarino.

El modelo del canal acústico al realizar la sumatoria de los bloques de presión en tránsito en el canal y el bloque de ruido ambiental y absorción, expresado mediante la ecuación (97) y que se presenta en la figura 57.

$$P(r) = \frac{P(f, 1yd)}{r^k} \cdot \sqrt{DI_{tx} \cdot DI_{rx}} \cdot e^{\frac{-\alpha(r-1) \times 10^{-3}}{8.69}} + NL(f) \quad \mu Pa \quad (97)$$

Observe que las variables de entrada son:

Vg: señal modulada en  $V_{rms}$ .

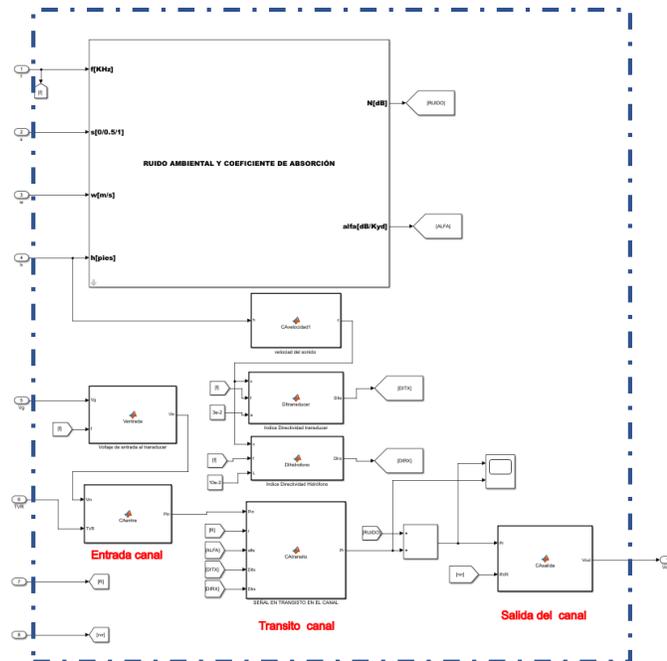
f: Frecuencia en KHz.

s: Tráfico marítimo.

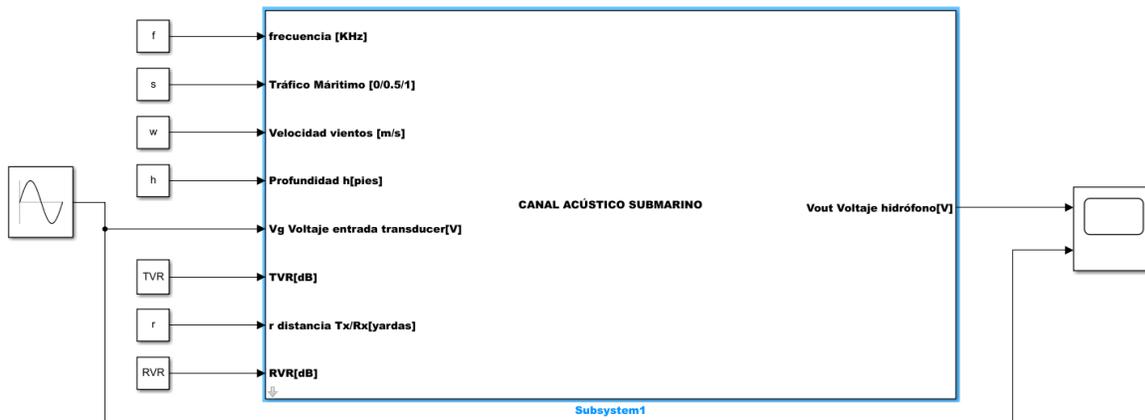
w: Velocidad del viento m/s.

h: Profundidad de los transductor e hidrófono en pies.

r: Distancia entre transductor e hidrófono en yardas.



CANAL ACUSTICO ORIGINAL SIN CARGAS



Instrucciones:  
 Debe crearse un programa matlab para cargar los datos  
 f: Frecuencia de operacion en KHz  
 s: Es el trafico maritimo entre 0<s<1  
 w: Velocidad del viento en m/s  
 r: Distancia entre TX y RX en yardas  
 h: Profundidad del Transducer e Hidrófono en pies  
 TVR: Respuesta de Voltaje como transmisor de transducer  
 RVR: Respuesta de Voltaje en recepcion del hidrófono

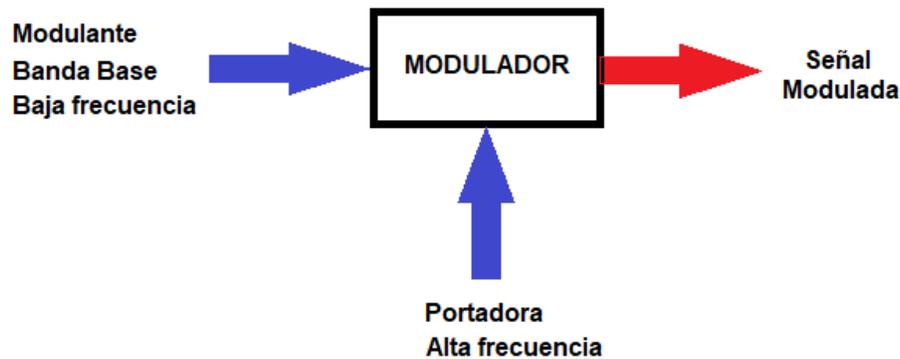
Figura 58. Se presenta el bloque que representa el canal acústico submarino.

Fuente: Propia.

#### 4.2.4. Modulación de la señal con la Información.

Con el propósito de evaluar la pertinencia del canal acústico submarino, se requiere ingresar señales con información digital y compararlos con los valores obtenidos a la salida del canal.

Dado que este proceso no es posible llevarlo a cabo de forma directa, debido a las características físicas de canal (Kinsler, Frey, Coppens, & Sander , 2000), se debe llevar un proceso de modulación/demodulación para cumplir con el requisito de que las señales que ingresen sean senoidales de alta frecuencia. (Clemente Medina , 2013), este proceso se ilustra en la figura 58.



*Figura 59. Diagrama que resumen el concepto de la modulación.  
Fuente: Propia.*

Para el caso del proyecto que nos atañe, el trabajo será realizado en dos tipos de modulaciones digitales a saber ASK y FSK.

##### 4.2.4.1. Modulación ASK.

En la cual la Amplitud de la señal modulante, en este caso digital, modifica de manera proporcional a la amplitud de la señal de alta frecuencia, o portadora. (Carrión Romero , 2015), ver figura 59.

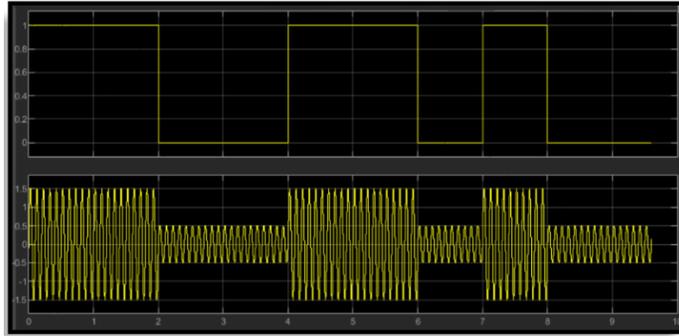


Figura 60. Se muestra el resultado de una señal modulada digitalmente en amplitud ASK.

En la figura 60, se presenta el circuito Modulador – Demodulador que será utilizado para lograr dicho cometido. En él puede observarse como un Generador binario de Bernoulli, entrega a un switch una secuencia aleatoria de cero y unos lógicos, y este dependiendo del valor dejará pasar una onda u otra. El resultado es tal como el presentado en la figura 59.

Por otro lado, con respecto al circuito demodulador es conocido como por detección síncrona, la cual consiste en multiplicar, analógicamente la señal ASK que llega al demodulador, por la señal portadora, la cual se genera localmente en el receptor.

A continuación, el resultado de este producto, se hace pasar por un filtro pasa bajo con frecuencia de corte menor que  $2\omega_c$ .

A continuación, se realiza un resumen de las principales características que deben ser consideradas al momento de realizar el análisis de la información procedente de este sistema de comunicaciones.

- Ancho de banda de nulo a nulo:  $B_T = 2B$ ; donde B es el ancho de banda de la señal Banda Base por lo tanto se concluye (Paz Penagos , 2009):

$$B_T = \frac{2}{T_{bit}} \quad (98)$$

- La relación energía de bit a Ruido específico será:

$$\frac{E_b}{N_o} = \left(\frac{S}{N}\right)_{dB} + \left(\frac{B}{f_b}\right)_{dB} \quad (99)$$

- La probabilidad de error típica es  $P(e) < 10^{-4}$  (Ortega , 2014)

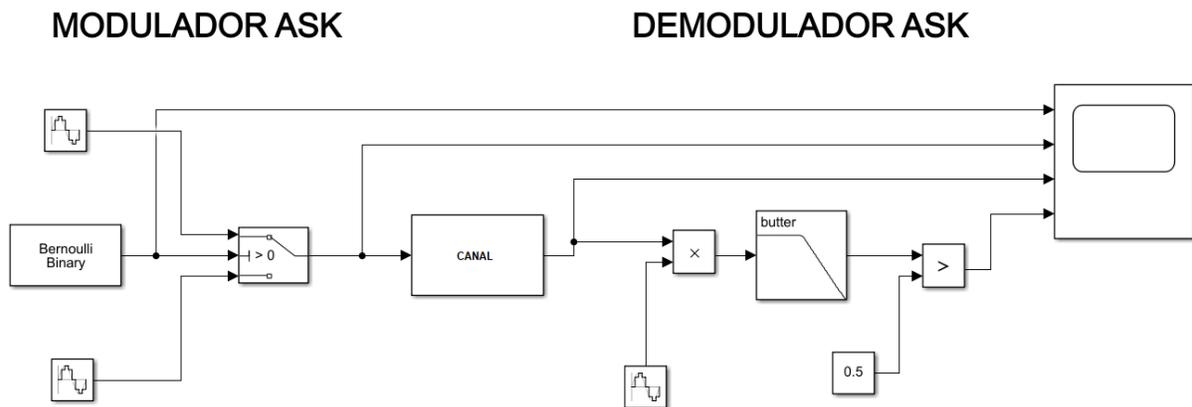


Figura 61. Se presentan los esquemas de modulación y demodulación ASK, implementados en el programa Simulink para la prueba del canal acústico submarino.

Fuente: Propia

#### 4.2.4.2. Modulación FSK.

En este caso la señal modulante, nuevamente digital entra a modificar la frecuencia de la portadora. (Carrión Romero , 2015) (Herrera Mejia & Arenas Pajaro , 2009)

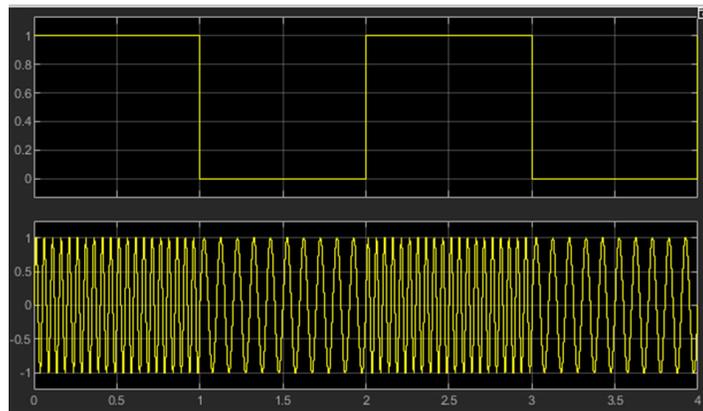


Figura 62. Se muestra el resultado de una señal modulada digitalmente en frecuencia FSK

En este tipo de modulación, al llegar un 1 lógico en la entrada del modulador, en su salida aparece una señal con una frecuencia mayor que la portadora, (esta frecuencia se llama de marca) y tiene la siguiente forma de la ecuación (100):

$$f_{marca} = f_c + \Delta f \quad (100)$$

Por otro lado, si en la entrada del modulador, aparece un cero lógico, en su salida se tendrá una frecuencia inferior a la portadora, (esta frecuencia se llama de espacio), y cumple con la ecuación (101).

$$f_{\text{espacio}} = f_c - \Delta f \quad (101)$$

El circuito seleccionado para la simulación de este tipo de modulador es el mismo que el elegido para la modulación ASK. Sin embargo, aquí se tendrá unas dos señales senoidales de igual amplitud, pero de frecuencias diferentes.

Con respecto al Demodulador, para la simulación será utilizado un demodulador por detección síncrona tal como se muestra en la figura 62, donde son presentados los circuitos modulador y demodulador FSK.

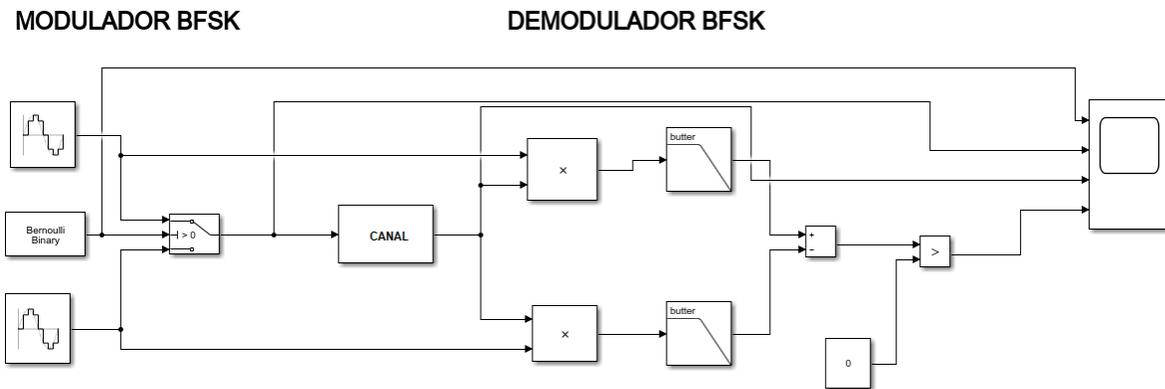


Figura 63. Montaje previsto para la simulación del comportamiento del Canal Acústicos Submarino operando con un modulador FSK. Fuente: Herrera, J.J.; Arenas, F. (2009) Monografía sobre modulación y demodulación FSK (Tesis) Universidad Tecnológica de Bolívar.

Con respecto a las expresiones para la evaluación del desempeño del sistema de comunicaciones FSK, se tienen:

- El ancho de banda aproximado  $B_T$  está dado por la regla de Carson:

$$B_T = 2(\beta + 1)B = 2(\Delta f + f_b) \quad (102)$$

Donde:

$$\beta = \frac{\Delta f}{B} \quad (103)$$

Si  $\beta \gg 1$ ; Se tendrá FSK de banda ancha; y  $B_T = 2\Delta f$

Si  $\beta \ll 1$ ; Se tendrá FSK de banda estrecha, y  $B_T = \frac{2}{T_{bit}}$

- La relación energía de bit a Ruido específico será:

$$\frac{E_b}{N_o} = \left(\frac{S}{N}\right)_{dB} + \left(\frac{B}{f_b}\right)_{dB} \quad (104)$$

### 4.3. Escenarios de simulación.

Estamos interesados en definir una serie de escenarios típicos que permitan establecer cuál es el comportamiento del canal acústico bajo ciertas condiciones, las cuales involucren estos dos tipos de modulaciones ya estudiadas.

#### 4.3.1. Tablas de variables

En este ítem se definirán los valores de entrada en la simulación, algunos son constantes del programa, otras ecuaciones y variables controlables y que definirán los diferentes escenarios.

**4.3.1.1. Variables no susceptibles al control:** Entre las variables relacionadas con el canal se tienen:

- Temperatura en el mar:  $T(z) = -0.0002z^3 + 0.0093z^2 - 0.2005z + 29 \text{ }^\circ\text{C}$
- Nivel de salinidad del mar:  $S(z) = 0.0008z^3 - 0.0497z^2 + 0.9409z + 32.47 \text{ ppm}$
- Perfil de velocidad del sonido: Se utiliza la expresión de Medwin, H
- Velocidad de los vientos: 5 a 8m/s
- Tráfico marítimo: 0/0.5/1 tráfico: ligero/moderado/pesado

Entre las variables relacionadas con los equipos instalados, se tienen:

- Índice de Directividad del transductor: Pistón Acústico Circular  $a=3\text{cm}$
- Frecuencia de resonancia del transductor: 57.5KHz
- TVR del Transductor =160.6dB
- Índice de Directividad de hidrófono: Fuente lineal simple  $L=10\text{cm}$
- RVR del hidrófono =-171dB

**4.3.1.2. Variables susceptibles al control:** A continuación, se presenta un listado de las variables susceptibles a ser modificadas durante la simulación.

- Profundidad del Transductor  $h$  en pies.
- Profundidad del hidrófono  $h$  en pies (se suponen a igual profundidad)
- Distancia entre transductor e hidrófono  $r$  en yardas.
- Tensión de alimentación al hidrófono  $V_g$ , corresponde a la tensión de la señal modulada con la cual se alimenta el transductor.
- Modulación digital utilizada: ASK y FSK.
- Tiempo de bit

### 4.3.2. Escenarios contemplados

#### Escenario No. 1

*Tabla 6 Potencia en el hidrófono vs. la variación de la frecuencia de operación*

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Tensión en el hidrófono vs. la variación de la frecuencia de operación			
<b>Tipo de Modulación</b>	Ninguna	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	Variable
<b>Profundidad transductor [m]</b>	4.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	Ninguna
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	10		
<b>Distancia entre Tx y Rx [m]</b>	100	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	4.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	9.72ns(5m/s)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

Su comportamiento se puede observar en la figura 63.

Se concluye que su comportamiento corresponde a un filtro pasa bajo, donde la se observa una disminución de la tensión en terminales de -130dBv, a partir de la frecuencia 20KHz.

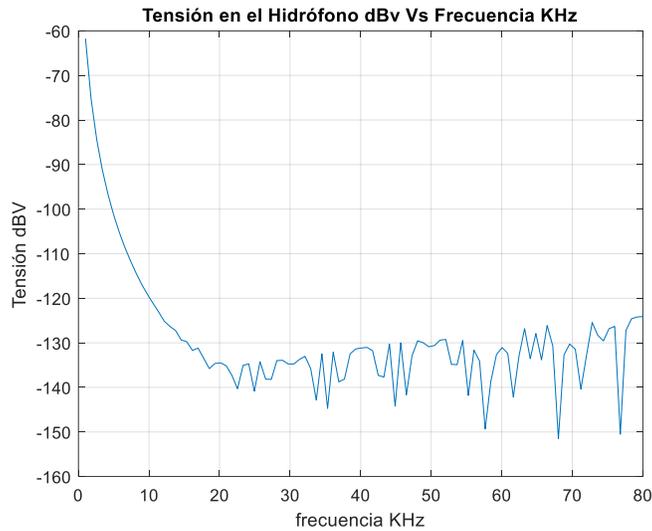


Figura 64. Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la frecuencia de operación.  
Fuente: propia

## Escenario No. 2

Tabla 7. Variación de la tensión en terminales con respecto a la separación entre el transductor y el hidrófono

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Variación de la tensión en terminales con respecto a la separación entre el transductor y el hidrófono			
<b>Tipo de Modulación</b>	Ninguna	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	Variable
<b>Profundidad transductor [m]</b>	4.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	Ninguna
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	10		
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	Variable	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	4.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	9.72ns(5m/s)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

El comportamiento se muestra en la figura 64, donde se puede apreciar una disminución lineal de la tensión en terminales de  $-0.06 \text{ dBV/km}$ . En forma general se cumple que la tensión en terminales disminuye con la distancia de separación.

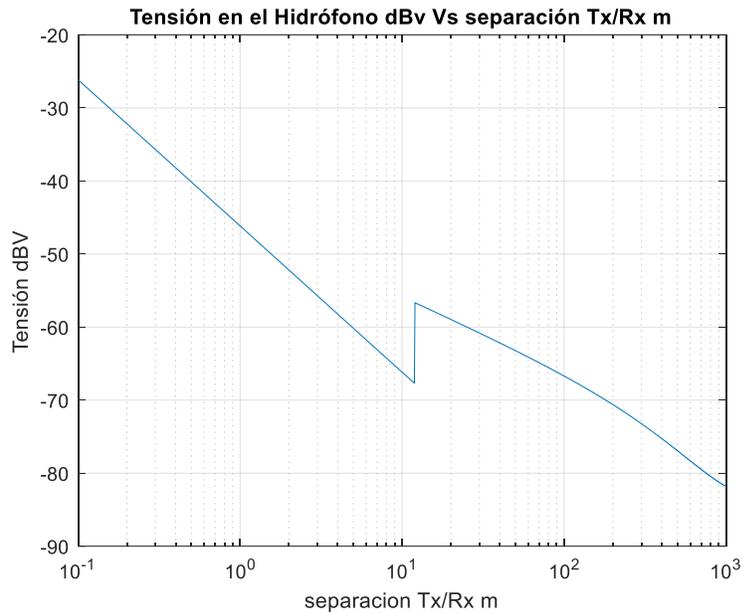


Figura 65. Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la distancia entre Tx y Rx.  
Fuente: propia

### Escenario No. 3

Tabla 8. Variación de la tensión en los terminales del hidrófono respecto a la profundidad de los elementos piezoeléctricos.

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Variación de la tensión en los terminales del hidrófono respecto a la profundidad de los elementos piezoeléctricos.			
<b>Tipo de Modulación</b>	Ninguna	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	Variable
<b>Profundidad transductor [m]</b>	Variable	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	Ninguna
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	10		
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	100	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	Variable
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	9.72ns(5m/s)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

Su comportamiento para las condiciones dadas figura 65, permiten concluir que el cambio de la profundidad de ambos hidrófonos, siempre un cuando estén a la misma profundidad no afecta la el valor de la tensión en bornes de hidrófono. (Salva Pando , 1994)

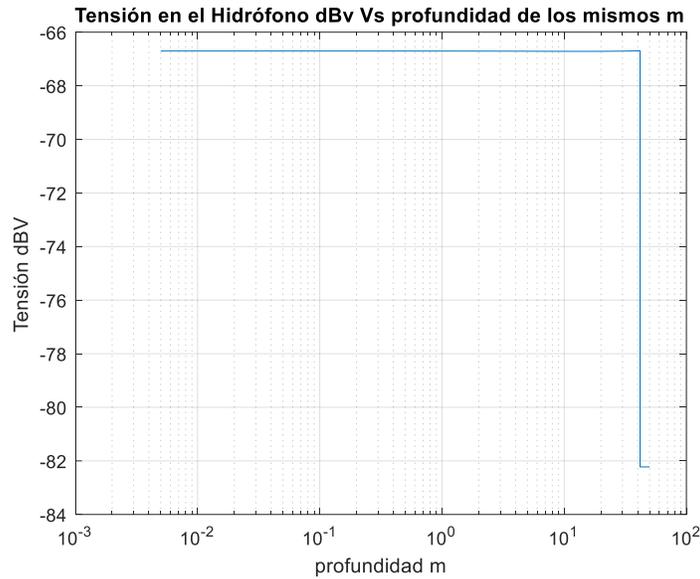


Figura 66. Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la profundidad de ambos elementos piezoeléctricos.  
Fuente: propia

#### Escenario No. 4

Tabla 9. Variación de la tensión en terminales del hidrófono al pasar el tráfico marítimo de condición: ligero  $s=0$  a pesado  $s=1$ .

PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO			
Variación de la tensión en terminales del hidrófono al pasar el tráfico marítimo de condición: ligero $s=0$ a pesado $s=1$ .			
Tipo de Modulación	Ninguna	Frecuencia portadora [KHz]	Variable
Profundidad transductor [m]	4	Frecuencia de la Moduladora [KHz]	Ninguna
Tensión de alimentación transductor [V]	10		
Distancia entra Tx y Rx [m]	100	Profundidad hidrófono [m]	4
Velocidad del viento [m/s]	9.72ns(5m/s)	Tipo de Trafico marino (S)	Variable

El comportamiento de este sistema bajo las condiciones propuestas, puede ser observado en la figura 66, donde se concluye que cuando el tráfico marítimo se incrementa, la tensión total en terminales del hidrófono también lo hace de manera exponencial y con gradiente positivo; se concluye por lo tanto, que al aumentar el tráfico marítimo, aumenta también la perturbación del mar y con ello, la presión en el

canal acústico lo que ocasiona un aumento de la tensión en terminales por las contribuciones de la señal y el ruido debido al tráfico marítimo. (Tomasi, 2003)

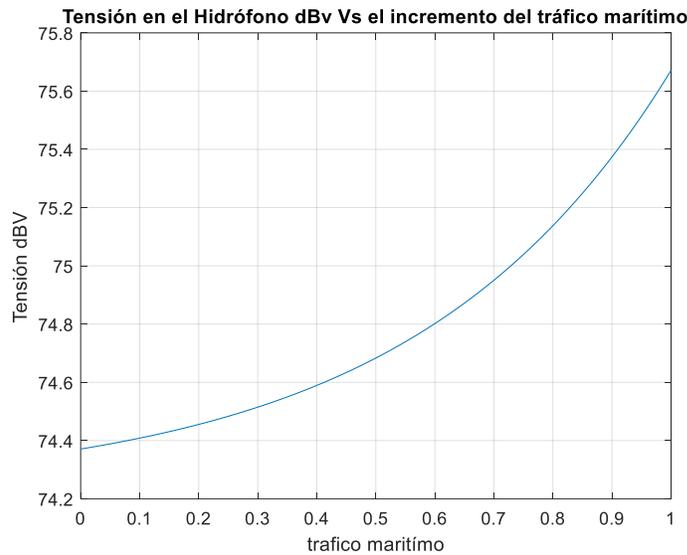


Figura 67. Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación del tráfico marítimo en la bahía de Cartagena.

Fuente: propia

## Escenario No. 5

Tabla 10. Variación de la tensión en terminales de hidrófono al incrementarse la velocidad de los vientos en la bahía de Cartagena

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Variación de la tensión en terminales de hidrófono al incrementarse la velocidad de los vientos en la bahía de Cartagena			
<b>Tipo de Modulación</b>	Ninguna	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	Variable
<b>Profundidad transductor [m]</b>	4	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	Ninguna
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	10		
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	100	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	4
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	Variable	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

El comportamiento de la tensión con la variación de la velocidad del viento en la Bahía de Cartagena se observa en la figura 67, en ella, la variación de la tensión en terminales del hidrófono es lineal y con pendiente positiva 0.018 dBV/nudo, es decir

en forma general el incremento de la velocidad del viento ocasiona un aumento de la presión en el canal, con lo cual se incrementa la tensión en los terminales del hidrófono.

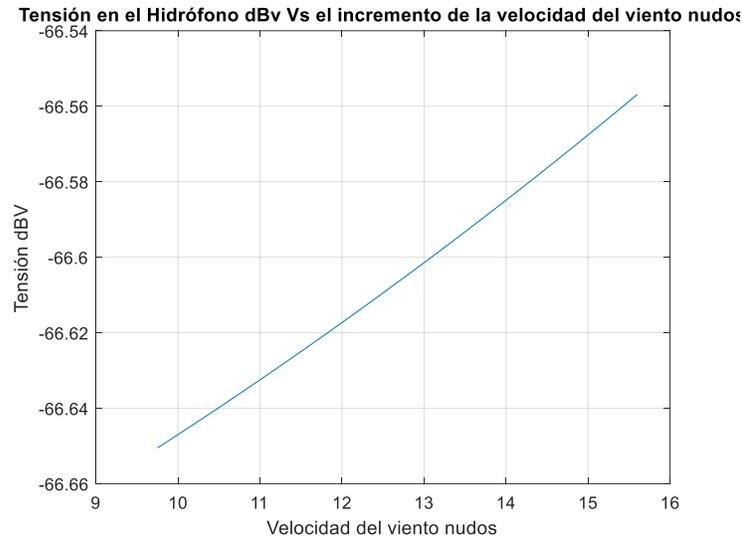


Figura 68. Comportamiento del canal acústico submarino, Tensión en los terminales del hidrófono con respecto a la variación de la velocidad del viento en la bahía de Cartagena.  
Fuente: propia

#### 4.3.2.2. Determinar cómo es el comportamiento de la BER, bajo diferentes escenarios que involucren modulación de una señal digital.

**4.3.2.2.1. Escenarios con modulación digital ASK:** El montaje realizado en Simulink, para esta simulación es el presentado en la figura No 68. En el cual se ha utilizado un switch con el propósito de alternar entre las dos fuentes de voltaje senoidales de amplitud  $V_{in}$  y  $V_{in}/2$  respectivamente de acuerdo con las variaciones de un generador de Bernoulli, el cual entrega una secuencia aleatoria de cero y unos lógicos, con una frecuencia igual al de la señal moduladora  $f_m$ . El resto de parámetros considerados en la simulación pueden ser observados en el protocolo de la misma en la Tabla 11.

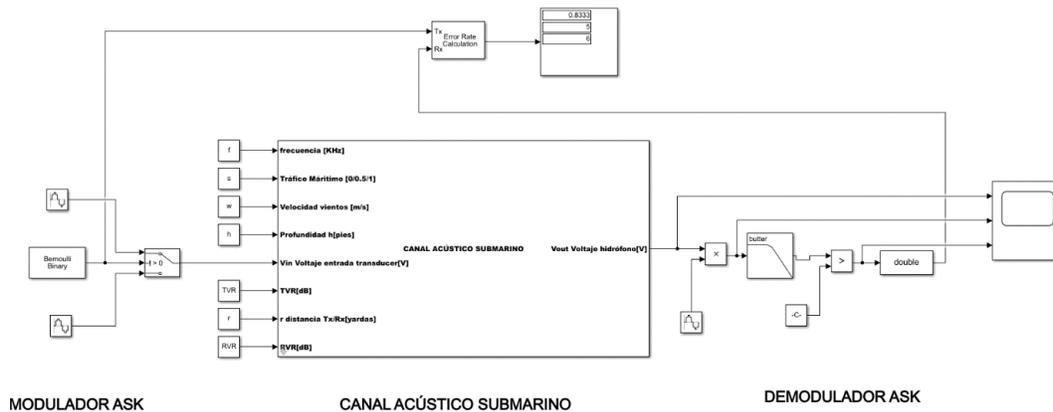


Figura 69. Se presenta el montaje final para la realización de la simulación del canal acústico submarino sometido a una modulación ASK y con medición de BER.  
Fuente: Propia.

## Escenario No. 6

Tabla 11: Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación ASK

PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO			
Simulación del canal acústico submarino bajo modulación ASK; encontrar la BER con respecto a la variación tensión de alimentación			
<b>Tipo de Modulación</b>	ASK	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	57.50
<b>Profundidad transductor [m]</b>	2.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	5.70
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	Variable		
<b>Observaciones</b>			
Se propone realizar una gráfica de Energía de bit contra el Ruido específico ( $E_b/N_o$ ) para lo cual se requiere variar la tensión de alimentación y observar la rata de error de bit para diferentes valores de tiempo de bit, iniciando por el valor del tiempo correspondiente a una señal moduladora de un décimo de la frecuencia portadora.			
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	100.00	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	2.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	11.82ns(23m/s)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

Los resultados de esta simulación, son presentados en la tabla No 12; y de manera aleatoria han sido seleccionados dos columnas para ser graficadas (Tiempos de bit 173ms y 174μs), la cuales son presentadas en la figura No 69, donde estos valores de  $E_b/N_o$ , parecen agruparse alrededor del 50% de la BER en todas las columnas; cosa que está en contra de la teoría dado que lo que debería acontecer, en realidad es que

a medida que el tiempo de bit  $T_b$ , disminuya la tasa de errores de bit se debe incrementar (Castaño Giraldo , 2020).

Problemas de este tipo ya había sido observados en los trabajos de campo, donde se concluyó, que, debido a la presencia del ruido de fondo, (el sonido de las lanchas rápidas, buques en la bahía, el ruido propio generado por el golpe de las olas en la embarcación o en el muelle), perturbaba en gran medida las mediciones realizadas.

Tabla 12. Comportamiento del modelo ante la variación del ancho del pulso de la señal digital.

BER EN MODULACIÓN ASK Vin: 1 a 100Vrms								
Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Tb[s]	Eb/No[dB]
1,73E-01	1,74E-02	1,91E-04	1,74E-04	1,74E-05	1,74E-06	1,74E-07	1,74E-08	
0,50	0,67	0,57	0,57	0,43	0,67	0,48	0,52	-12,0
0,50	0,57	0,43	0,57	0,71	0,24	0,43	0,43	-6,0
0,33	0,43	0,48	0,67	0,52	0,52	0,29	0,67	-2,4
0,83	0,24	0,43	0,52	0,57	0,43	0,57	0,76	0,1
0,83	0,52	0,48	0,43	0,48	0,52	0,43	0,43	2,0
0,33	0,52	0,57	0,62	0,43	0,57	0,48	0,43	3,6
0,83	0,29	0,62	0,62	0,43	0,67	0,43	0,52	4,9
0,50	0,52	0,43	0,43	0,43	0,38	0,57	0,62	6,1
0,33	0,43	0,62	0,52	0,48	0,52	0,38	0,52	7,1
0,50	0,43	0,38	0,43	0,67	0,52	0,43	0,57	8,0
0,33	0,43	0,67	0,43	0,57	0,43	0,52	0,48	8,8
0,67	0,43	0,33	0,52	0,48	0,43	0,76	0,67	9,6
0,33	0,62	0,38	0,43	0,52	0,48	0,43	0,43	10,3
0,33	0,43	0,48	0,52	0,48	0,43	0,48	0,43	10,9
0,33	0,24	0,57	0,86	0,33	0,38	0,33	0,48	11,5
0,17	0,67	0,33	0,43	0,43	0,67	0,52	0,67	12,1
0,33	0,52	0,48	0,43	0,57	0,38	0,71	0,52	12,6
0,33	0,71	0,62	0,67	0,33	0,48	0,48	0,48	13,1
0,33	0,38	0,48	0,52	0,43	0,57	0,48	0,33	13,6
0,50	0,62	0,43	0,48	0,57	0,33	0,43	0,43	14,0

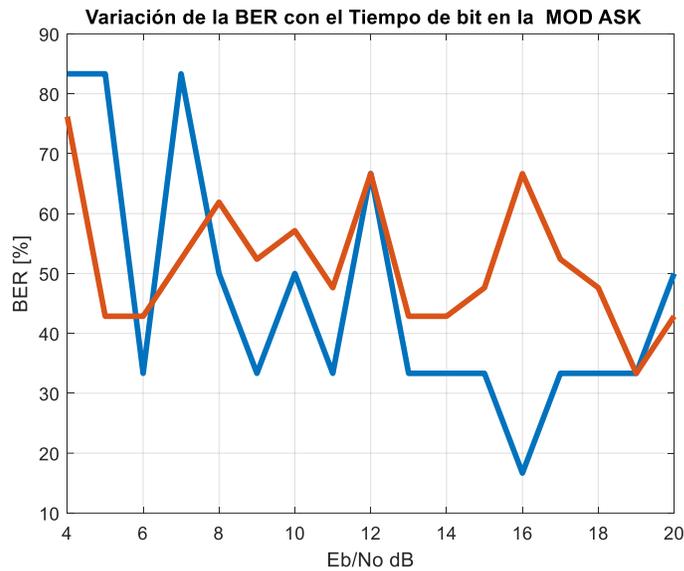


Figura 70. Comportamiento del modelo del canal acústico con respecto a la variación del tiempo de bit.

Fuente: Propia.

Como conclusión se obtuvo que este tipo de modulación AM y/o ASK no son confiables en este medio, donde existe todo tipo de ruido ambiental que afectan la amplitud de la onda de presión de la onda de sonido tal como ya se había observado en las 66 y 67; una mirada a la tabla 12 y a la figura 69, permite tomar la decisión de continuar el estudio únicamente con la modulación FSK.

**4.3.2.2. Escenarios con modulación digital FSK:** Una vez tomada la decisión de continuar el estudio del canal con la Modulación FSK, se presenta el circuito implementado en simulink en el cual ya han sido integrados los sistemas previamente estudiados: Modulador/Demodulador FSK y el canal acústico submarino, tal como pueden ser observados en la figura 70.

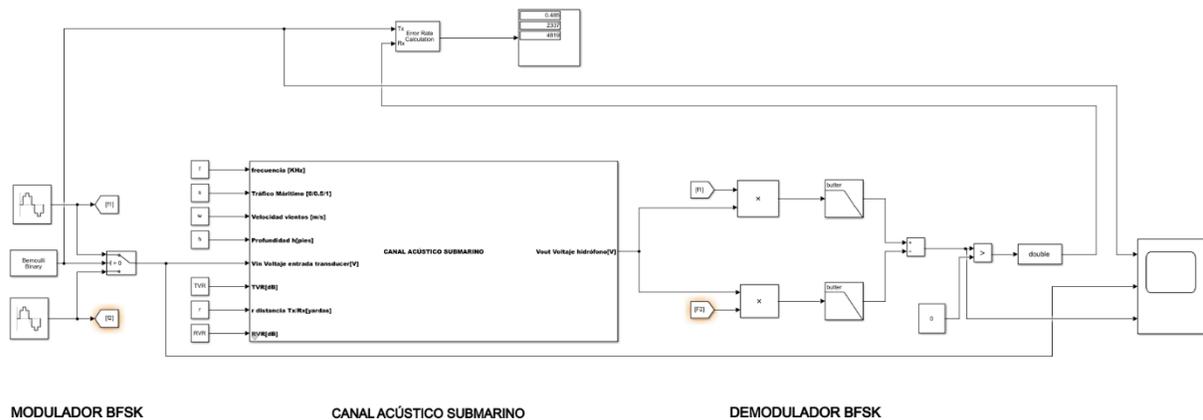


Figura 71. Se presenta el montaje final para la realización de la simulación del canal acústico submarino sometido a una modulación FSK y con medición de BER.

Fuente: Propia.

## Escenario No. 7

Emitir una señal en la frecuencia de resonancia  $f_c$ , manteniendo constantes los siguientes parámetros:

Ruido Ambiental; Distancia transmisor receptor; profundidad de las celdas piezoeléctricas, observar la tabla 13.

La característica que será observada es el comportamiento de la  $E_b/N_0$ , a medida que se modifica el Tiempo de  $T_b$ ; para cumplir este objetivo se requiere hacer variar la tensión que alimenta el transductor para diferentes tiempos de bit.

Tabla 13: Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK.

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Comportamiento de la $E_b/N_0$ , a medida que se modifica el Tiempo de bit $T_b$			
<b>Tipo de Modulación</b>	FSK	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	57.50
<b>Profundidad transductor [m]</b>	2.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	5.70
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	Variable	<b>Frecuencia marca [KHz]</b>	$f_c+100$
		<b>Frecuencia espacio [KHz]</b>	$f_c-100$

<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	100.00	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	2.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	14.40(23 ns)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1

Los resultados de esta simulación son presentados en la tabla 14

Tabla 14. Variación de BER, al considerar diferentes tiempos de  $T_b$  en la señal modulante. Fuente: propia

<b>BER EN MODULACIÓN FSK</b>					
<b>Tiempo de bit <math>T_b</math>[s]</b>					<b><math>E_b/N_0</math>[dB]</b>
<b>1,73E+00</b>	<b>1,73E-01</b>	<b>1,73E-02</b>	<b>1,73E-03</b>	<b>1,73E-04</b>	
0,00	39,53%	42,19%	53,76%	31,95%	0,05
0,00	0,00%	0,00%	19,57%	5,00%	1,99
0,00	0,00%	0,00%	4,27%	1,82%	3,57
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,91
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,07
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	7,10
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8,01
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	8,84
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	9,59
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,29
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,93
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,53
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	12,09
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	12,62
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,12
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,59
0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	14,03

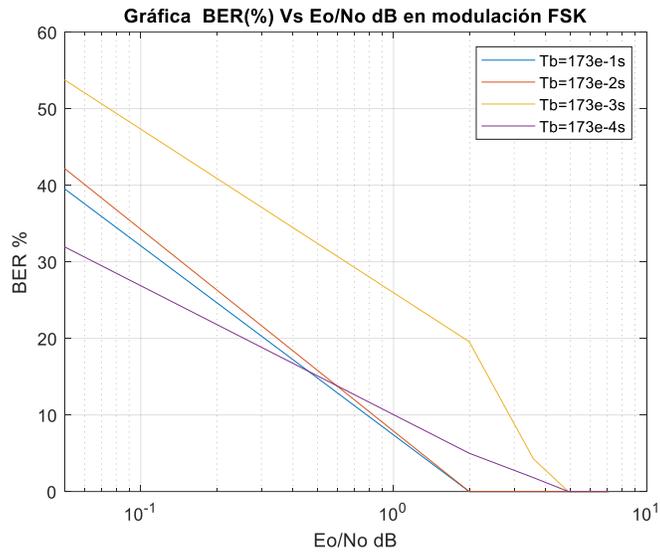


Figura 72. Variación de la tasa de errores de bit con respecto a la relación Eo/No para diferentes valores de tiempo de bit Tb.  
Fuente: Propia.

### Observaciones a partir de la figura 70 y tabla 14

- Se observa la siguiente tendencia, a medida que el tiempo de bit disminuye, aumenta la tasa de errores de bit. La explicación a este hecho encuentra en el hecho de que todo sistema físico posee características capacitivas, es decir de oponerse a los cambios bruscos; en este caso a las variaciones bruscas de presión (Haykin, 2001).
- También es evidente que en niveles de bajos de Eb/No, se presentan un porcentaje mayor de errores de bit.
- Pero lo que es realmente interesante, es que, para las condiciones propuestas en la simulación en el protocolo, que son realmente las adversas, como son:
  - i. Tráfico marítimo crítico  $s=1$ ;
  - ii. Velocidad del viento 23 Nudos,
  - iii. Y para una distancia de 100m, con 100v de alimentación,

Se puede contar con una comunicación con 0% de errores, eligiendo un tiempo de bit adecuado

- Es evidente en esta simulación, que los valores de tensión para establecer comunicaciones confiables no requieren tener valores superiores a 100v, sino inferiores.

## Escenario No. 8

Ahora consideremos un caso práctico, en el cual se acercarán las celdas piezoeléctricas y en cada punto, a una distancia fija  $r$  será calculado el valor de la BER para diferentes valores de tensión aplicado al transductor. Las consideraciones sobre la simulación se presentan en la tabla 15.

Tabla 15: Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK.

<b>PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO</b>			
Comportamiento de la rata de errores de bit al variar la separación entre Tx/Rx a diferentes valores de tensión sobre del transductor.			
<b>Tipo de Modulación</b>	FSK	<b>Frecuencia portadora [KHz]</b>	57.50
<b>Profundidad transductor [m]</b>	2.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	5.70
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	Variable	<b>Frecuencia marca [KHz]</b>	fc+100
		<b>Frecuencia espacio [KHz]</b>	fc-100
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	Variable	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	2.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	14.40(23 ns)	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1
<b>Observaciones</b> Para este escenario se tomará el valor del tiempo de bit constante con valor de 173ms. La distancia entre Transductor e hidrófono se permitirá aumentar desde 10 a 90 en paso de 10m. La tensión aplicada al transductor variará entre 1.0 a 15v en pasos de 10V.			

Los resultados de este escenario se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados el escenario 2. Donde se permite alejarse el hidrófono desde 1m hasta 90 metros, y en cada punto se hace variar el voltaje desde 1 a 15 v, registrándose el valor obtenido de la BER.

VARIACIÓN DE LA BER A MEDIDA QUE EL HIDRÓFONO SE ALEJA DEL TRANSDUCER CONSIDERANDO VARIACIONES DE VOLTAJE										
v(v)	1,0	2,6	4,1	5,7	7,2	8,8	10,3	11,9	13,4	15,0
r(m)										
1	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	12%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	19%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	24%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	28%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	34%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	32%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	39%	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Variación de la BER Vs separación entre Tx/Rx. Alimentación hidrófono 1V

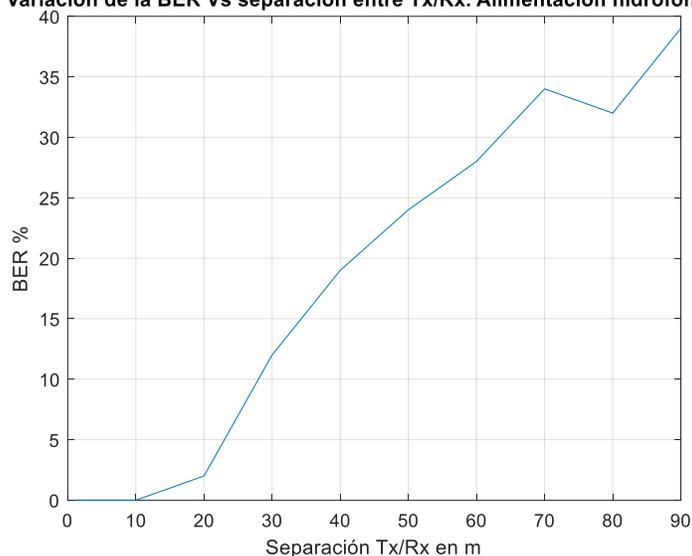


Figura 73. Variación de la tasa de errores de bit BER con respecto a la relación a la distancia de separación entre transmisor y receptor, con una alimentación de 1V al transductor.  
Fuente: Propia.

## Observaciones

- La primera conclusión se obtiene directamente de la observación de la tabla 16, y refuerza la conclusión obtenida en el análisis del Escenario No 7, los niveles de tensión, para establecer los enlaces son inferiores a 100V, en este análisis se ha encontrado que con 2.6V, es suficiente para establecer enlaces con BER de 0%, para cualquier distancia comprendida entre 1 y 90 metros de separación entre transducer e hidrófono.
- Se confirma la afirmación realizada en el escenario anterior y es que para este sistema de comunicación específico no se requiere tener una fuente de

alimentación con niveles altos de tensión. Claro está, estos están en relación directa con las características de transductor es decir el TRV =161.6 dB ref 1V/ $\mu$ Pa y del hidrófono RVR = -170dB ref 1 $\mu$ Pa, en nuestro caso son dispositivos que bien podríamos categorizar como de buena calidad. (Uribe Gómez & Vélez Hurtado, 2017)

- De igual manera, de la observación de la figura 71, de confirma una sospecha lógica: si se conserva un nivel de tensión de alimentación del transductor, al aumentar el valor de la distancia entre transductor e hidrófono la rata de errores de bit, se incrementarán, hasta hacer imposible la comunicación entre ello.

## Escenario No. 9

Ahora demos un vistazo a uno de los parámetros que más dificulta las comunicaciones y el funcionamiento del sonar, como es el ruido generado por oleaje debido a los vientos sobre la superficie, de acuerdo con los Capitanes Cortes y Pinzón (Cortes , 2012). Se presenta en la Tabla 17, la categorización para los vientos.

*Tabla 17. Categorización de los vientos. Fuente: Proyecto de grado: Desarrollo de un método de comparación de sistemas de sonar para plataformas de superficies; Capitán Andrés Cortes y Capitán Ennio Emmanuel Pinzón Villaroel, Escuela Naval Almirante Padilla Cartagena 2012)*

Nombre de la categoría	Vientos	Marea
Depresión tropical	0-17 m/s	0 m
Tormenta tropical	18-32 m/s	0 - 3 m
Huracán – categoría 1	33 - 42 m/s	1.2 -1.5 m
Huracán – categoría 2	43 - 49 m/s	1.8 - 2.4m

Consideremos entonces como afecta la comunicación al 100m de distancia los valores más altos de estos vientos presentados en la tabla 17. Y considerando una tensión de 12 voltios, que es lo correspondiente a una batería de automóvil. El protocolo de esta simulación puede ser visto en la tabla 18.

*Tabla 18: Protocolo de prueba de la simulación del canal acústico submarino bajo modulación FSK, enfrentado vientos en las cuatro categorías de la tabla 17.*

PROTOCOLO DE SIMULACIÓN CANAL ACÚSTICO SUBMARINO			
Variación de la tasa de errores de bit con respecto a la variación de la velocidad de los vientos sobre la superficie del mar.			
Tipo de Modulación	FSK	Frecuencia portadora [KHz]	57.50

<b>Profundidad transductor [m]</b>	2.0	<b>Frecuencia de la Moduladora [KHz]</b>	5.70
<b>Tensión de alimentación transductor [V]</b>	12v	<b>Frecuencia marca [KHz]</b>	fc+100
		<b>Frecuencia espacio [KHz]</b>	fc-100
<b>Distancia entra Tx y Rx [m]</b>	100	<b>Profundidad hidrófono [m]</b>	2.0
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	Variable	<b>Tipo de Trafico marino (S)</b>	Intenso s=1
<b>Observaciones</b>			
Para este escenario se tomará el valor del tiempo de bit constante con valor de 173ms. Esta simulación busca observar la importancia de los vientos en las comunicaciones acústicas submarinas.			

Los resultados de esta simulación son presentados en la tabla 19.

*Tabla 19. Resultados de la simulación en busca de la relación entre los vientos y la BER.*

*Fuente: Propia.*

<b>VARIACIÓN DE LA BER CON EL VIENTO SOBRE LA SUPERFICIE DEL MAR</b>	
<b>Velocidad del viento [m/s]</b>	<b>BER [%]</b>
5,00	0,00%
10,00	0,00%
15,00	0,00%
20,00	0,00%
25,00	2,20%
30,00	11,80%
35,00	17,00%
40,00	22,03%
45,00	26,53%
50,00	28,74%

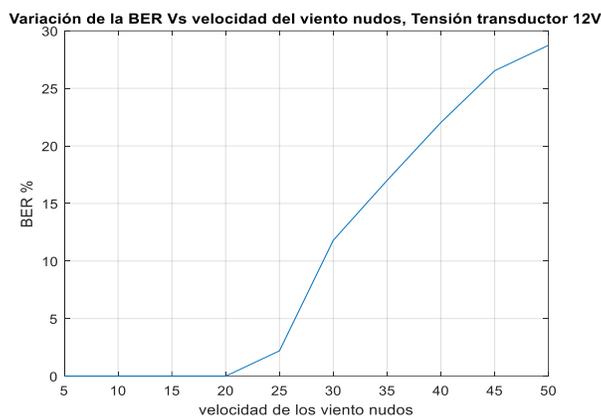


Figura 74. Variación de la tasa de errores de bit BER con respecto a la variación de la velocidad de los vientos, con una alimentación de 12V al transductor.

Fuente: Propia.

## Observaciones

- Se observa en la figura No 72, como a medida que aumenta la velocidad de los vientos sobre la superficie del mar, lo hace de manera proporcional la tasa de errores de bit. Este hecho contrasta con lo concluido en el estudio de escenario No 5, donde se observó como un aumento de la velocidad de los vientos propiciaba un aumento en la tensión de los terminales del hidrófono.
- Con respecto al escenario 6, figura 71, se observa que al aumentar el BER por el incremento de la velocidad de viento, una alimentación del transductor de 1V, no sería suficiente para establecer el enlace entre dos puntos situados a 100m, por lo cual es indispensable aumentar la tensión en los terminales del transductor a un nivel de 12V.

# Conclusiones.

## Con respecto al primer objetivo específico del proyecto:

Se ha obtenido para el circuito de comunicaciones establecido para la simulación el siguiente cuadro de variables del sistema:

Variables no susceptibles al control: Entre las variables relacionadas con el canal se tienen:

- Temperatura en el del mar en la bahía de Cartagena:  
 $T(z) = -0.0002z^3 + 0.0093z^2 - 0.2005z + 29 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Nivel de salinidad del mar en la bahía de Cartagena:  
 $S(z) = 0.0008z^3 - 0.0497z^2 + 0.9409z + 32.47 \text{ ppm}$
- Perfil de velocidad del sonido: Se utiliza la expresión de Medwin, H, dado que se encuentra en los límites de salinidad y latitud para los cuales fue elaborada.
- Velocidad de los vientos: 5 a 8m/s en la bahía de Cartagena.
- Tráfico marítimo: 0/0.5/1 tráfico: ligero/moderado/pesado

Entre las variables relacionadas con los equipos seleccionados y probados en las instalaciones de la Escuela Naval Almirante Padilla:

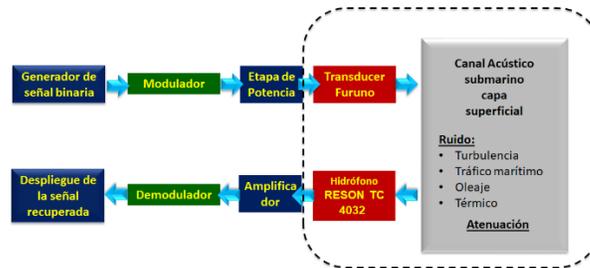
- Índice de Directividad del transductor: Pistón Acústico Circular radio de  $a=3\text{cm}$
- Frecuencia de resonancia del transductor: 57.5KHz
- TVR del Transductor =160.6dB
- Índice de Directividad de hidrófono: Fuente lineal simple, longitud de  $L=10\text{cm}$
- RVR del hidrófono =-171dB

Variables susceptibles al control: A continuación, se presenta un listado de las variables susceptible a ser modificadas durante la simulación.

- Profundidad del Transductor  $h$  en pies.
- Profundidad del hidrófono  $h$  en pies (se suponen a igual profundidad)
- Distancia entre transductor e hidrófono  $r$  en yardas.
- Tensión de alimentación al hidrófono  $V_g$ , corresponde a la tensión de la señal modulada con la cual se alimenta el transductor.
- Modulación digital utilizada: ASK y FSK.
- Tiempo de bit

## Con respecto al segundo objetivo específico del proyecto:

Se elaboró un diagrama de bloque del sistema de comunicaciones acústico submarino que se implementaría para la simulación, tal como es presentado en la figura No 53,



A partir de este diagrama de bloque, se consultaron fuentes bibliográficas con el objetivo de conocer las expresiones analíticas que rigen la propagación de las ondas acústicas submarinas en la capa superficial y de manera específica, la forma de contextualizarlas al escenario de la bahía de Cartagena.

Por otro lado, se realizó el estudio de las características de los elementos piezoeléctricos transductor e hidrófonos, que permiten acoplar las señales eléctricas al medio acústico submarino, con el objetivo de conocer su funcionamiento, obtener y verificar de manera experimental las ecuaciones analíticas que permitieran integrarlos al sistema de comunicaciones al simular.

Una vez con el diagrama de bloque del sistema de comunicaciones definido, al igual que sus componentes y las ecuaciones analíticas, se realizó el modelo virtual, para lo cual se utilizó el programa Simulink.

### **Con respecto al segundo objetivo específico del proyecto:**

Con respecto a la simulación del canal acústico submarino se obtuvieron las siguientes conclusiones sobre el mismo.

- Se concluye que el comportamiento del canal acústico submarino corresponde a un filtro pasa bajo, donde se observa una disminución de la tensión en terminales de -130dBv, a partir de la frecuencia 20KHz.
- Con respecto a la variación de la distancia entre transductor e hidrófono con respecto a la tensión en los terminales del hidrófono estando el transductor alimentado con una tensión constantes, se concluye que en forma general se cumple que la tensión en terminales disminuye con el aumento de la distancia de separación entre Tx/Rx.
- Con respecto a la experiencia de variar la profundidad de ambos elementos piezoeléctricos, se concluye que siempre un cuando ambos estén a la misma profundidad no resulta afectado el valor de la tensión en bornes de hidrófono.

- En forma general el incremento de la velocidad del viento ocasiona un aumento de la presión de forma lineal en el canal, con lo cual se incrementa la tensión en los terminales del hidrófono.
- Se encontró que la modulación ASK, es vulnerable a los cambios de presión, es decir resulta afectado por la presencia de fenómenos como el oleaje, el tránsito de embarcaciones marítimas, por lo tanto, no se recomienda para este tipo de sistema de comunicaciones.
- Se observa la siguiente tendencia, a medida que el tiempo de bit disminuye, aumenta la rata de errores de bit. La explicación a este hecho encuentra en el hecho de que todo sistema físico posee características capacitivas, es decir de oponerse a los cambios bruscos; en este caso a las variaciones bruscas de presión.
- Es evidencio en las simulaciones, que los valores de tensión para establecer comunicaciones confiables, es decir bajo niveles de BER, no requieren tener valores superiores a 100v, para 100m de separación, velocidad de 5m/s y tráfico marítimo intenso.
- Los niveles de tensión, para establecer los enlaces son inferiores a 100V, en este análisis se ha encontrado que con 2.6V en los terminales del transductor es suficiente para establecer enlaces con BER de 0%, para cualquier distancia comprendida entre 1 y 90 metros de separación entre transducer e hidrófono y condiciones adversas de velocidad del viento y tráfico marítimo intenso.
- La afirmación realizada que no se requiere tener una fuente de alimentación con niveles altos de tensión, está en relación directa con las características del transductor es decir el TRV =161.6 dB ref 1V/ $\mu$ Pa y del hidrófono RVR = -170dB ref 1 $\mu$ Pa, en este caso son dispositivos que bien se podrían categorizar como de buena calidad.
- Si se conserva un nivel de tensión de alimentación del transductor constante , al aumentar el valor de la distancia entre transductor e hidrófono la rata de errores de bit, se incrementarán, hasta hacer imposible la comunicación entre ello.
- Al aumenta la velocidad de los vientos sobre la superficie del mar, lo hace de manera proporcional la rata de errores de bit. Este hecho contrasta con lo afirmación realizada que un aumento de la velocidad de los vientos propiciaba un aumento en la tensión de los terminales del hidrófono.

# Bibliografía

- Andreade Amaya , C. A., Rangel Parra, O. E., & Herrera Vásquez , E. (2015). Anexo A. Media Mensual Multianual Superficial 1922-2013. *Atlas de los datos oceanográficos de Colombia 1922-2013. Temperatura, salinidad, densidad, velocidad geostrófica*, 30-35.
- Angeles Madrigal , A. I., & Flores Robledo , G. (2008). *ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN DE DISPERSIÓN COMO PARTE FUNDAMENTAL DEL MÉTODO DE MODOS NORMALES ENFOCADO A LAS COMUNICACIONES SUBACUÁTICAS*. Mexico : Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica .
- Aparicio , J., García Nuñez, E., Jiménez Martín , A., & Álvarez, F. J. (2010). Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (II). *Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá*.
- BASIC . (2017). *Bahía de Cartagena Resumen para tomadores de decisión* . Cartagena : BASIC .
- Bermúdez Arciniegas , N., & Murcia Gallo , H. L. (2012). Estimación de la firma acústica en la etapas de diseño y pruebas de mar. *Derrotero. Revista de la Ciencia y la Investigación*.
- Borda Garcia , O. J., & Mendoza Valero , L. C. (2019). *MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO*. Bogotá: Universidad Santo Tomás Facultad de Ingeniería Electrónica .
- Carrión Romero , J. A. (2015). *MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DIGITALES DE COMUNICACIONES EN MATLAB/ SIMULINK*. Guayaquil, Ecuador: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL .
- Castaño Giraldo , S. A. (Dirección). (2020). *Introducción al Simulink - [Conoce sobre el CURSO COMPLETO]* [Película].
- Clemente Medina , M. d. (2013). *Modulación adaptativa y diversidad en canales de comunicaciones acústicas subacuáticas*. Malaga : Universidad de Málaga, Servicio de Publicaciones.
- Cortes , A. (2012). *Desarrollo de un método de comparación de sistema de Sonar para plataformas de superficies*. Cartagena : Escuela Naval Almirante Padilla .
- Díaz Hoyos , G. (2004). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE SONAR PARA LA DETECCIÓN DE BLANCOS*. Cartagena, Colombia : Universidad Tecnológica de Bolívar Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica .

- Etter, P. C. (2003). *Underwater Acoustic Modeling and simulation* . New York: Taylor & Francis Group.
- García Martínez, M. D. (2018). *Detección, cuantificación y análisis de*. Málaga : Facultad de Ciencias (Universidad de Málaga).
- Gómez Magenti, P. (2016). *Estudio de la calibración de sensores acústicos por el método de reciprocidad para diferentes geometrías. Aplicación a la evolución temporal de la sensibilidad de los hidrófonos en instalaciones in situ*. GANDIA: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA ESC U EL A POLITE CNIC A SUPER IOR DE GANDIA.
- González, A. F., Cesari, R. M., & Vicioli , R. O. (s.f.). *Materiales piezoelctricos y efecto piezoeléctrico* . Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional FAcultad Regional Mendoza Dpto Electrónica .
- Grisales López, C. H., Salgado Mesa , J. A., & Morales Babra , R. J. (2014). Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos. *Boletín Científico CIOH*, 47-70.
- Guerra, R. (s.f.). Datos “BATY” de interés en acústica oceanográfica. Tratamiento previo a su uso como parámetros útiles en caracterización marina zonal. *Revista Acústica Vol XXXII No 3 y 4*, 25-30.
- Hernández Pérez, E. (2010). *Nuevos algoritmos de localización, seguimiento e identificación de fuentes en escenarios con agrupaciones de sensores concentradas y distribuidas*. Las Palmas gran Canaria : Universidad de Las Palmas de Gran Canaria .
- Hernandez Reyes, A. I. (2015). *Diseño y Construcción de transmisor receptor acústico para la localizacion de equipos oceanográficos fondeado en un cuerpo de agua* . Altamira, Tamaulipas : Instituto Politecnico Nacional Centro de investigación en tecnología aplicada avanzada CICATA-IPN unidad Altamira .
- Herrera Mejia , J. J., & Arenas Pajaro , F. (2009). *MONOGRAFÍA SOBRE MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN FSK*. Cartagena : UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELETRÓNICA .
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sander , J. V. (2000). *FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS* . New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Kuperman , W. A., & Roux, P. (2016). *Underwater Acoustics*.

- Leyton Vásquez, H. E., & Roa Becerra, N. R. (2017). Representación matemática y técnica de caracterización para celdas piezoeléctricas, una revisión bibliográfica . *Minuto de Dios I*, vol.12 No22, 65-74.
- López Revuelta, Á. (s.f.). *Modelado de la propagación acústica submarina para comunicaciones PtP*. Madrid : Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación .
- Ortega , M. (2014). *MATLAB - Aplicado a telecomunicaciones*. Mexico : Alfaomega Grupo editor S.A.
- Pagliardini, J. L., Gómez A, M. A., Gutierrez A, H., Zapata D. , S. I., Jurado R, A., Garay T. , J. A., & Vernet, G. (1982). Síntesis del Proyecto Bahía de Cartagena . *Boletín Científico CIOH*, 49-110.
- Paz Penagos , H. (2009). *Sistemas de comunicaciones digitales*. Bogotá Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Pires , J., Colombo , M., Gallardo , J. I., & De Marziani, C. (2012). Modelo de canal acústico subacuático vertical en redes de sensores para monitoreo costero. *IEEE Argencon* , Córdoba Argentina .
- Quino Cerdan , M., & Rabinovich, V. S. (2009). Análisis de propagación de onda acústica en océanos estratificados mediante el método de modos normales. *Latin-American Journal of Physics Education*,, 452 - 458.
- Ranz Guerra, C. (s.f.). Aguas muy poco profundas en acústica submarina. Factores que limitan la propagación de señales. *Revista de Acústica Vol 38 no 1 y 2* , 16 - 27.
- Redondo , L., & Mateo Ruiz , A. (2017). Underwater Noise: Fundamentals, Sources, Assessments and Acoustic. *CEDEX -CENTRO DE ESTUDIO Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS* , 73-94. Obtenido de <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3A5F4F9A-6B54-4EBC-98CE-57A0E264DDD1/146077/RuidoSubacuatico186.pdf>
- Restrepo , J. C., Franco , D., Escobar , J., Correa , I. D., Otero , L., & Gutiérrez , J. (2013). Bahía de Cartagena (Colombia): distribución de sedimentos superficiales. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 99-112.
- Salva Pando , A. J. (1994). *Acústica Submarina* . Lima : Escuela de submarinos Marina de guerra de Perú .
- Sánchez Matias, A. M. (2013). *Sistema de comunicación acústica paraa redes de sensores inalámbricas subacuáticas en aguas someras*. Valencia : UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA .

- Shannon, C. E. (29 de October de 1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technicall Journal*, pág. 79.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* . Mexico : Pearson Educacion .
- Uribe Gómez, A. F., & Vélez Hurtado, J. A. (2017). *Diseño e implementación de un sistema de comunicación subacuática basado en la emisión y recepción de señales en el rango de frecuencias de ultrasonido*. Medellín, Colombia: Universidad de San Buenaventura Colombia Facultad de Ingenierías Ingeniería Electrónica.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of underwater sound* . Altos de California : Peninsula Publishing.
- VALENCIA, U. P. (Dirección). (2013). *Cómo utilizar S-Functions en Simulink* [Película].
- Veloso Alarcón , M. E. (2007). *Simulación de propagación de ondas sonoras con aplicaciones en Acústica Subacuática* . Valdivia-Chile : Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Acústica .
- Vidal Melo , A. (Dirección). (2017). *Una introduccion al ajuste polinómico de datos por mínimos cuadrados, utilizando Matlab* [Película].
- Waite, A. (2002). *Sonar for Practising bngineers*. England : John Wiley & Sons Ltd.

## Apéndice H.

Archivo: RESONANCIA.xlsx

Datos utilizados para realizar el cálculo de la resistencia de resonancia y la resistencia de resonancia  $R_m$  del Transductor Furuno.

F(Khz)	V2	V1	Rm
35,00	1,14	19,00	3.191,49
35,50	1,16	19,00	3.251,12
36,00	1,14	19,00	3.191,49
36,50	1,12	19,00	3.131,99
37,00	1,12	19,00	3.131,99
37,50	1,06	19,00	2.954,29
38,00	1,06	19,00	2.954,29
38,50	1,06	19,00	2.954,29
39,00	1,04	19,00	2.895,32
39,50	0,98	19,00	2.719,20
40,00	0,94	19,00	2.602,44
40,50	0,88	19,00	2.428,26
41,00	0,90	19,00	2.486,19
41,50	1,00	19,00	2.777,78
42,00	0,98	19,00	2.719,20
42,50	0,96	19,00	2.660,75
43,00	0,92	19,00	2.544,25
43,50	0,90	19,00	2.486,19
44,00	0,82	19,00	2.255,23
44,50	0,80	19,00	2.197,80
45,00	0,78	19,00	2.140,50
45,50	0,76	19,00	2.083,33
46,00	0,72	19,00	1.969,37
46,50	0,64	19,00	1.742,92
47,00	0,62	19,00	1.686,62
47,50	0,56	19,00	1.518,44
48,00	0,52	19,00	1.406,93
48,50	0,48	19,00	1.295,90
49,00	0,42	19,00	1.130,25
49,50	0,34	19,00	911,04

50,00	0,32	19,00	856,53
50,50	0,30	19,00	802,14
51,00	0,38	19,00	1.020,41
51,50	0,46	19,00	1.240,56
52,00	0,56	19,00	1.518,44
52,50	0,64	19,00	1.742,92
53,00	0,78	19,00	2.140,50
53,50	0,92	19,00	2.544,25
54,00	1,10	19,00	3.072,63
54,50	1,38	19,00	3.916,00
55,00	1,72	19,00	4.976,85
55,50	2,18	19,00	6.480,38
56,00	2,72	19,00	8.353,81
56,50	3,26	19,00	10.355,78
57,00	3,72	19,00	12.172,77
57,50	3,82	19,00	12.582,35
58,00	3,64	19,00	11.848,96
58,50	3,20	19,00	10.126,58
59,00	2,98	19,00	9.300,87
59,50	2,66	19,00	8.139,53
60,00	2,44	19,00	7.367,15
60,50	2,26	19,00	6.750,30
61,00	2,10	19,00	6.213,02
61,50	1,96	19,00	5.751,17
62,00	1,82	19,00	5.296,86
62,50	1,78	19,00	5.168,41
63,00	1,70	19,00	4.913,29
63,50	1,66	19,00	4.786,62
64,00	1,58	19,00	4.535,02
64,50	1,52	19,00	4.347,83
65,00	1,48	19,00	4.223,74
65,50	1,42	19,00	4.038,68
66,00	1,36	19,00	3.854,88
66,50	1,34	19,00	3.793,88
67,00	1,28	19,00	3.611,74
67,50	1,34	19,00	3.793,88
68,00	1,28	19,00	3.611,74
68,50	1,32	19,00	3.733,03
69,00	1,36	19,00	3.854,88
69,50	1,32	19,00	3.733,03

70,00	1,28	19,00	3.611,74
70,50	1,28	19,00	3.611,74
71,00	1,22	19,00	3.430,82
71,50	1,22	19,00	3.430,82
72,00	1,18	19,00	3.310,89
72,50	1,16	19,00	3.251,12
73,00	1,14	19,00	3.191,49
73,50	1,10	19,00	3.072,63
74,00	1,10	19,00	3.072,63
74,50	1,08	19,00	3.013,39
75,00	1,06	19,00	2.954,29

## Apéndice J.

Archivo: CALCULO\_TVR.xlsx

Datos Utilizados para el cálculo de la característica TVR del transductor Furuno.

VALORES PARA ESTABLECER EL TVR DEL TRANSDUCTOR FURUNO.

f(KHZ)	Vin transductor	Vout hidrófono
44,17	0,78	0,20
45,90	0,76	0,40
46,18	0,73	0,20
47,63	0,73	0,77
48,95	0,73	0,48
49,78	0,62	0,50
50,68	0,71	0,93
51,23	0,76	0,82
52,37	0,76	0,57
53,24	0,74	0,43
54,00	0,76	0,10
55,28	0,77	0,40
56,28	0,78	0,24
57,51	0,77	0,25
58,66	0,77	0,25
59,63	0,77	0,25
60,32	0,77	0,25
61,67	0,77	0,11
62,17	0,78	0,10
63,85	0,77	0,15
64,51	0,78	0,10
65,06	0,78	0,12
66,44	0,78	0,12
67,44	0,78	0,11
70,71	0,78	0,14
71,20	0,78	0,11

72,27	0,78	0,12
73,66	0,78	0,12
74,66	0,78	0,14
75,16	0,78	0,11
76,84	0,78	0,11
80,54	0,79	0,13
85,16	0,78	0,11
90,15	0,78	0,16
95,23	0,78	0,11
97,02	0,78	0,17
98,46	0,78	0,16
99,69	0,78	0,23
100,86	0,78	0,16

## Apéndice L.

**Archivo: tabla.xlsx**

Datos tomados en la bahía de Cartagena en el año de 2004. Por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográfica.

PROFUNDIDAD (m)	TEMPERATURA (°C) PROMEDIO	SALINIDAD (pmm) PROMDEIO
0,50	29,00	32,00
1,00	29,00	33,20
1,50	28,90	35,00
2,00	28,60	33,20
2,50	28,50	34,60
3,00	28,30	35,30
3,50	28,40	35,90
4,00	28,20	35,50
4,50	28,10	35,10
5,00	28,10	36,80
5,50	28,10	36,40
6,00	28,00	36,30
6,50	27,90	37,30
7,00	28,00	37,10
7,50	27,90	38,10
8,00	27,90	38,70
8,50	27,90	37,90
9,00	27,90	37,40
9,50	27,80	38,60
10,00	27,80	37,40
10,50	27,80	38,60
11,00	27,80	37,10
11,50	27,70	37,90
12,00	27,70	39,50
12,50	27,70	38,50
13,00	27,70	38,00
13,50	27,70	37,70

14,00	27,60	38,60
14,50	27,60	38,80
15,50	27,60	37,70
16,00	27,60	38,20
16,50	27,60	38,60
17,00	27,50	38,00
17,50	27,50	37,50
18,00	27,50	38,70
18,50	27,40	38,80
19,00	27,50	38,50
19,50	27,50	38,70
20,00	27,50	38,20
20,50	27,40	39,00
21,00	27,40	39,60
21,50	27,40	37,10
22,00	27,40	38,30
22,50	27,40	38,50
23,00	27,40	38,80
23,50	27,40	38,70
24,00	27,40	39,20
24,50	27,30	38,80
25,00	27,30	38,50
25,50	27,30	38,50
26,00	27,30	38,70
26,50	27,30	38,90
27,00	27,30	38,60
27,50	27,30	38,60
28,00	27,30	38,30
28,50	27,30	37,40
29,00	27,30	38,60
29,50	27,20	38,60
30,00	27,20	38,70

