

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias de Mar

Evaluación de las características vibro-acústicas del diseño del domo de sonar instalado en un buque oceanográfico

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Jorge Ricardo Alcívar Castro

Evelyn Stefania Heredia Cruz

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios quien me ha permitido llegar hasta donde estoy, a mi familia y amigo por formar parte de esta travesía, en especial a mi madre y a mi tía por ser el motor para perseguir este sueño y creer en mí, que al inicio parecía imposible. Finalmente, pero no menos importante, dedico este proyecto a mi tutor y demás docentes, por transmitirme sus conocimientos y lograr formar un buen profesional.

Jorge Ricardo Alcívar Castro

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a Dios por darme sabiduría, inteligencia, fuerza y valor para poder alcanzar este gran logro, a mi familia por apoyarme en todo momento y a todas las personas aportaron con un granito de arena a lo largo de mi carrera universitaria. Agradezco de todo corazón a mi amigo Jorge Alcívar por haber sido un excelente compañero de tesis y sobre todo por el apoyo y motivación en los momentos difíciles.

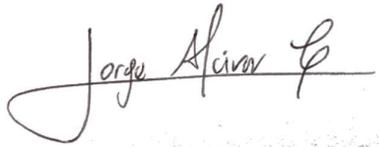
Evelyn Stefania Heredia Cruz

Agradezco a Dios, a mis padres, hermanos y amigos que la vida me regalo. Finalmente, agradezco a mi compañera y amiga Evelyn Heredia por el esfuerzo y arduo trabajo que realizamos para culminar el presente proyecto de tesis durante este tiempo.

Jorge Ricardo Alcívar Castro

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jorge Ricardo Alcívar Castro* y *Evelyn Stefania Heredia Cruz* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jorge Ricardo Alcívar Castro



Evelyn Stefania Heredia Cruz

EVALUADORES

.....
Nadia Muñoz Agila, M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Rubén Paredes Alvarado, Ph.D

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto propone una metodología para la valoración del ambiente acústico en el interior del domo de sonar tipo apéndice, instalado en embarcaciones de superficie. El objetivo es evaluar las características vibro- acústicas del interior del domo de sonar instalado en el buque oceanográfico BAE Orión, mediante el cálculo de pérdidas de transmisión acústica para luego realizar una comparación con las predicciones del fabricante.

Con el fin de comprender el funcionamiento del sistema sonar y su interacción con el domo, se investigó de forma cuantitativa en: transductores, instalación del sonar, instrumentación y medición acústica. Posteriormente, se estimó el ruido inducido provocado por las fluctuaciones de presión del flujo en las paredes del domo y la transparencia acústica del material, identificando los factores y variables de diseño hidrodinámicos, estructurales y vibro-acústicos de la geometría del domo que influyen en la pérdida de transmisión acústica del sonar.

Finalmente se evaluó de forma preliminar la influencia del domo en el rendimiento del sonar considerando 7 condiciones. Concluyendo que el domo en estudio no cumple la condición de frecuencia crítica para un espesor de pared de 9[mm], lo cual indica que las placas en dirección a proa y popa permitirán el ingreso de ondas de ruido viajando a frecuencias de 300 y 33 [KHz] respectivamente. Sin embargo, la geometría si cumple con 6 de estas condiciones propuestas, convirtiéndolo en una geometría aceptable con una diferencia del 11% con respecto a las predicciones del fabricante en las pérdidas del nivel de señal.

Palabras Clave: vibro-acústica, ruido inducido, transparencia, pérdidas.

ABSTRACT

This project proposes a methodology for assessing the acoustic environment inside the appendix-type sonar dome, installed in surface vessels. The objective is to evaluate the vibro-acoustic characteristics of the interior of the sonar dome installed in the BAE Orión oceanographic vessel, by calculating acoustic transmission losses and then making a comparison with the manufacturer's predictions.

To understand the operation of the sonar system and its interaction with the dome, it was quantitatively investigated in: transducers, sonar installation, instrumentation and acoustic measurement. Subsequently, the induced noise caused by the pressure fluctuations of the flow in the dome walls and the acoustic transparency of the material was estimated, identifying the hydrodynamic, structural and vibro-acoustic design factors and variables of the dome geometry that influence the sonar acoustic transmission loss.

Finally, the preliminary form of the influence of the dome on sonar performance was evaluated considering 7 conditions. Concluding that the dome under study does not meet the critical frequency condition for a wall thickness of 9 [mm], which indicates that the plates in the forward and aft direction will allow the entry of noise waves traveling at frequencies of 300 and 33 [KHz] respectively. However, the geometry does meet 6 of these proposed conditions, making it an acceptable geometry with a difference of 11% concerning the manufacturer's predictions in signal level losses.

Keywords: *vibro-acoustics, induced noise, transparency, losses.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XII
CAPÍTULO 1	13
1. Introducción	13
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Justificación del problema	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo General	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 Marco teórico	15
1.4.1 Principios físicos del sonar.....	15
1.4.2 Vibraciones y fenómenos acústicos	17
1.4.3 Fundamento teórico sobre la estimación del ruido inducido en el sonar	21
1.4.4 Pérdidas de transmisión acústica generadas por el domo	22
CAPÍTULO 2.....	23
2. Metodología	23
2.1 Características del Buque Oceanográfico BAE Orión	23
2.1.1 Especificaciones técnicas	24

2.1.2	Condiciones de navegación	24
2.2	Descripción del Sonar EM 302	25
2.2.1	Componentes del Sonar EM 302	26
2.3	Descripción del Domo instalado en el BAE Orión	31
2.3.1	Especificaciones técnicas	32
2.3.2	Predicciones acústicas del fabricante	34
2.3.3	Fuentes de ruido que influyen en el sonar	35
2.4	Características vibro-acústicas de los domos	36
2.4.1	Fluctuaciones de presión de la capa limite en la pared del domo	36
2.4.2	Transparencia acústica de la pared del domo.....	42
2.4.3	Tamaño y ubicación del domo	47
2.5	Metodología de evaluación del rendimiento del domo de sonar	48
CAPÍTULO 3.....		49
3.	Resultados y Análisis	49
3.1	Evaluación de las características vibro-acústicas	49
3.2	Verificación de los rangos permitidos en el domo del BAE Orión	61
3.3	Variación entre los resultados obtenidos y las predicciones del fabricante...	63
3.4	Evaluación del ambiente acústico al interior del domo instalado en el BAE Orión	65
CAPÍTULO 4.....		67
4.	Conclusiones y Recomendaciones	67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador
SONAR	Sonido, Navegación y Rango
BAE	Buque Armada del Ecuador
EM	Ecosonda Multihaz

SIMBOLOGÍA

ω	Frecuencia natural
a, b	Dimensiones de la placa
Φ	Función de densidad espectral de potencia de presión turbulenta
ΔN	Número medio de nodos
ΔF	Banda de frecuencia
Pa	Pascales
Hz	Hertz
h, t	Espesor de la placa
H, d	Profundidad de inmersión
dB	Decibeles
c	Velocidad del sonido
ω_c	Frecuencia de coincidencia de la placa
δ^*	Espesor de desplazamiento de la capa límite turbulenta
c_s	Velocidad de la onda de corte del material
c_p	Velocidad de propagación de compresión del sonido
θ_i	Ángulo incidente
θ_c	Ángulo crítico
U_o, U_∞	Velocidad del buque-domo
U_c	Velocidad de convección media de capa límite turbulenta
S_{pp}	Densidad espectral cruzada de la presión de la pared turbulenta
S_{dd}	Densidad espectral cruzada de desplazamiento de la pared turbulenta
S_{aa}	Densidad espectral de potencia de aceleración de la placa
RMS_{acc}	RMS de la aceleración de la pared

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de sonar [7]	16
Figura 1.2 Ubicación según la forma del domo [Propia]	17
Figura 1.3 Forma de onda Ruido – Sonido [7]	18
Figura 1.4 Efecto de Absorción [9].....	18
Figura 1.5 Efecto de reflexión y refracción [9].....	19
Figura 1.6 Principales fuentes de ruido propio [2].....	20
Figura 1.7 Fuentes de ruido generado por maquinarias a bordo [Propia].....	20
Figura 1.8 Líneas de corriente de flujo sobre el casco y domo [Propia].....	21
Figura 1.9 Modelo teórico de una placa simplemente soportada [2].....	21
Figura 2.1 Buque de la Armada Ecuatoriana Orión [18]	23
Figura 2.2 Ruta reportada en Cruceros Regionales a Galápagos del 2013 (amarillo) y 2017 (rojo) [4].....	25
Figura 2.3 Sonar EM 302 instalado en el BAE Orión [4].....	25
Figura 2.4 Unidades del sistema EM 302 [5]	26
Figura 2.5 Diagrama del funcionamiento del Sonar EM 302 [Propia]	27
Figura 2.6 Configuración cruzada de Mills en T [19].....	28
Figura 2.7 Esquema de alineación en T de transductores de transmisión y recepción [5].....	28
Figura 2.8 Arreglo de los módulos de transmisión TX [5]	29
Figura 2.9 Arreglo de los módulos de recepción RX [5].....	30
Figura 2.10 Parámetros de operación del sonar [Propia].....	31
Figura 2.11 Domo instalado en BAE Orión [Propia].....	31
Figura 2.12 Domo ubicado a 1/3 L en el BAE Orión [Propia].....	32
Figura 2.13 Vistas de perfil y superior del Domo [Propia].....	33
Figura 2.14 Arreglo estructural del domo [4].....	33
Figura 2.15 Curva de Coeficiente de absorción de la señal acústica [20].....	35
Figura 2.16 Fuentes de ruido que influyen en el sonar [2]	36
Figura 2.17 Modelo teórico empleado en el análisis. [Propia].....	37
Figura 2.18 Modelo simplificado de la placa plana rectangular [2]	37
Figura 2.19 Dirección de transmisión y recepción de la señal [Propia].....	42

Figura 2.20 Interfaz, Agua de mar – Placa de acero- Agua de mar [Propia].....	43
Figura 2.21 Variación del espesor en función de la frecuencia acústica con pérdidas de transmisión a incidencia normal menor a 3 [dB] para una placa de acero, [6].....	45
Figura 2.22 Efecto de coincidencia [6]	46
Figura 2.23 Ubicación del domo [Propia]	47
Figura 2.24 Metodología para evaluar el ambiente acústico del sonar [10]	48
Figura 3.1 RMS de la aceleración vs porcentaje de la longitud del domo [propia].....	50
Figura 3.2 RMS aceleración de la pared vs velocidad del buque al 45% la longitud de la pared del domo [Propia]	51
Figura 3.3 RMS aceleración de la pared vs velocidad del buque a 6%, 53% y 93% la longitud de la pared del domo [Propia]	51
Figura 3.4 RMS de la aceleración total del domo vs velocidad del buque operando a 30kHz [Propia]	52
Figura 3.5 Zonas de señal-ruído en el domo de sonar BAE Orión, 2D [Propia].....	53
Figura 3.6 Longitud de onda vs Frecuencia acústica [Propia]	54
Figura 3.7 Angulo critico de flexión vs $f > f_c$ [Propia]	55
Figura 3.8 Coeficiente de transmisión para ondas de incidencia normal vs frecuencia acústica [Propia]	56
Figura 3.9 Coeficiente de transmisión de una onda acústica viajando a 30 [KHz] a diferentes ángulos de incidencia [Propia]	56
Figura 3.10 Variación de perdida por transmisión de una placa plana de acero en función del ángulo de incidencia y el producto $f \cdot h$ [KHz.in], [6].....	57
Figura 3.11 Pérdidas por inserción vs ángulo de incidencia, frecuencia 30[KHz], [Propia]	58
Figura 3.12 Pérdidas por reflexión del sonido para ondas de incidencia normal vs frecuencia [Propia].....	58
Figura 3.13 Pérdidas de transmisión acústica para ondas de incidencia normal vs frecuencia [Propia].....	59
Figura 3.14 Pérdidas por Transmisión a incidencia aleatoria vs frecuencia [Propia] .	59
Figura 3.15 Curva de pérdidas por inserción de la placa vs frecuencia [24].....	61
Figura 3.16 Curva de pérdidas por reducción del eco, vs frecuencia [24]	61
Figura 3.17 RMS aceleración de las paredes de los domos vs domos [Propia]	62

Figura 3.18 Pérdidas de transparencia acústica en las paredes de los domos vs domos [Propia].....	63
Figura 3.19 Comparación de las pérdidas de transmisión por influencia del domo con las predicciones del fabricante [Propia]	64
Figura A.1 Diagrama en bloque del sistema multihaz EM-302 instalado en el BAE Orión [25]	74
Figura B.1 Dimensiones generales del módulo de transmisión TX [5].....	75
Figura B.2 Dimensiones generales del módulo de recepción RX [5]	76
Figura C.1 Líneas de Forma del BAE Orión antes de la instalación del domo de sonar [Propio]	77
Figura D.1 Espesor de la capa limite vs porcentaje de la longitud del domo [Propia]	78
Figura D.2 Espesor de la capa limite vs porcentaje de la longitud del domo Rao [Propia]	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Dimensiones Principales del BAE Orión [18]	24
Tabla 2.2 Características principales del arreglo, Matriz TX y RX [5]	28
Tabla 2.3 Dimensiones principales de un módulo TX [5]	29
Tabla 2.4 Dimensiones principales de un módulo RX [5].....	30
Tabla 2.5 Parámetros operativos del Sonar EM 302 [5]	30
Tabla 2.6 Ubicación longitudinal del domo del BAE Orión [Propia].....	32
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas del domo de sonar [Propia]	33
Tabla 3.1 Dimensiones de los domos analizados [Propia].....	49
Tabla 3.2 Parámetros principales requeridos en la evaluación de la pared del domo [Propia]	53
Tabla 3.3 Frecuencia de coincidencia y ángulos críticos según los modos básicos de vibración de una placa de acero [Propia].....	54
Tabla 3.4 Pérdidas por Transmisión a incidencia aleatoria vs frecuencia [Propia]	60
Tabla 3.5 Características principales de la placa utilizada en la referencia [Propia]..	60
Tabla 3.6 Dimensiones de los rangos de domos evaluados [Propia].....	62
Tabla 3.7 Comparación entre los resultados obtenidos y las predicciones del fabricante, 11% de pérdidas [Propia]	64
Tabla D.1 Cálculos para la estimación del espesor de la capa limite [Propia]	78
Tabla D.2 Dimensiones principales del domo instalado en el BAE Orión [Propia].....	79
Tabla D.3 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo [Propia]	81
Tabla D.4 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo [Propia]	82
Tabla D.5 Resumen de la estimación para el RMS de aceleración, diferentes velocidades y porcentaje de la longitud de pared [Propia].....	83
Tabla D.6 Cálculos para la estimación del espesor de la capa limite [Propia]	84
Tabla D.7 Dimensiones principales del domo analizado en RAO [2].....	85
Tabla D.8 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo de RAO [Propia].....	87

Tabla D.9 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo RAO [Propia].....	88
Tabla D.10 Resumen de la estimación para el RMS de aceleración, diferentes velocidades y porcentaje de la longitud de pared del domo RAO [Propia]	89
Tabla E.1 Formato para evaluar el ambiente acústico al interior del domo instalado en el BAE Orión	93

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Líneas de Formas del BAE Orión antes de la instalación del domo de sonar

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El uso de sonares permite a los buques cumplir diversas funciones que van desde el mapeo del fondo marino, detección de los cardúmenes, hasta la localización de vehículos marinos u objetos sumergidos. Los domos son considerados como apéndices del buque porque su geometría sobresale del casco y su función es garantizar la integridad física del sistema de sonar, soportando las cargas mecánicas generadas por la navegación del buque a diferentes velocidades sin afectar la operatividad acústica del sonar [1].

La geometría del domo debe ser hidrodinámica y acústicamente transparente para generar un ambiente acústico que maximice la precisión de la señal entrante y minimice el ruido inducido por el flujo [2]. El ruido inducido por el flujo influye en el rendimiento de detección del sonar, y se genera una región de transición cuando el fluido pasa por la pared externa del domo con una velocidad constante. A esta región se la denomina como capa límite y puede estar caracterizada por condiciones de flujo turbulento generando fluctuaciones de presión sobre la superficie del domo tipo apéndice, induciendo un movimiento transversal de la pared que se traduce en vibraciones transmitidas al interior del domo, lo que ocasiona una pérdida en la transmisión acústica de aproximadamente 6 dB en promedio, cuando la embarcación navega a altas velocidades [3].

Es importante considerar las características vibro-acústicas en la etapa de diseño del domo, ya que estas combinan los factores estructurales, hidrodinámicos y acústicos, obteniendo así una geometría de domo que genere menos influencia en el rendimiento del sonar. Por ejemplo, Paredes [4] determinó que la instalación de un domo en el buque oceanográfico BAE Orión provocó un aumento del 25% de la resistencia al avance, y una disminución significativa en la velocidad máxima de navegación. Esto evidenció que el diseño del domo consideró solamente el factor acústico del problema. Una de las soluciones que sugiere el autor para disminuir la resistencia al avance es la modificación de la geometría del domo considerando los tres factores antes mencionados. Esto evidenció la necesidad de establecer una metodología probada para evaluar la eficiencia de la geometría

del domo instalado en el buque oceanográfico BAE Orión, con el propósito de valorar el ambiente acústico en el interior.

1.1 Descripción del problema

El Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, INOCAR, ha reportado que su buque de investigación, BAE Orión, experimentó una pérdida de velocidad luego de la instalación de un domo, durante una repotenciación realizada en el 2010. Este domo es parte de un sistema con un ecosonda multihaz y un perfilador sísmico, diseñados e instalados por la empresa noruega Kongsberg. Con el objetivo de proteger el sonar, esta empresa diseñó el domo en base a las dimensiones principales del buque y la velocidad de 5 nudos, requerida para el óptimo funcionamiento del sistema sonar. La empresa diseñadora recomendó ubicar el domo a una distancia desde proa entre 10 m o un tercio de la eslora de la embarcación, es decir 23.40 m [5].

Actualmente, el BAE Orión realiza cruceros de investigación con una duración de 25 días, navegando a una velocidad de 5 nudos necesarios para realizar la batimetría del fondo marino. Mientras que, la embarcación alcanza una velocidad promedio de 6 a 7 nudos durante el viaje de ida y retorno, a pesar de que su velocidad de diseño original era de 12 nudos.

1.2 Justificación del problema

Un estudio previo sobre el comportamiento hidrodinámico numérico del buque oceanográfico BAE Orión determinó que el domo, instalado en el 2008, provocó un aumento del 25% en la resistencia al avance, alteración de la maniobrabilidad operativa y el flujo de agua que llega a las hélices propulsoras. Además, se sugiere suavizar la geometría del domo para disminuir su impacto en el aumento de la resistencia al avance [4]. Sin embargo, se deben evaluar las alteraciones que esta modificación en la geometría del domo tendría en la operatividad del sonar. Este proyecto pretende identificar una metodología, que permita evaluar la eficiencia de la geometría del domo, valorando el rendimiento acústico en el interior del domo, incluyendo las pérdidas de transmisión acústica generadas por el domo. Dicha metodología servirá para beneficiar a las embarcaciones que consideren instalar domos, ya sean estos buques de investigación, militares o de pesca.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las características vibro-acústicas del sonar instalado en el BAE Orión, mediante el cálculo de pérdidas de transmisión acústica usando formulaciones semiempíricas, para la valoración del ambiente acústico en el interior del domo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los domos son apéndices utilizados en los buques con el propósito de garantizar la integridad física del sistema del sonar, siendo diseñados para no afectar la operatividad acústica, razón por la cual este trabajo pretende:

1. Comprender el funcionamiento del sistema de sonar EM 302 instalado en el BAE Orión y su interacción con el domo.
2. Identificar las características vibro-acústicas, que producen pérdidas de transmisión acústica del sonar empleadas en el diseño del domo.
3. Cuantificar la pérdida de transmisión acústica del sonar aplicando las formulaciones empíricas del diseño.
4. Evaluar la calidad acústica del diseño del domo a partir de los resultados empíricos y las predicciones del fabricante del sistema sonar.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Principios físicos del sonar

La palabra "SONAR" es una abreviatura de la frase en inglés "Sound, Navigation And Ranging" que significa navegación por sonido. Un sonar se basa en el principio de eco-sonido, cuando las ondas de sónicas se transmiten a través del agua, son reflejadas por los objetos en el agua y producirán una señal de eco, debido al efecto Doppler, el cual permite determinar la velocidad y la dirección del objeto. El sonar se utiliza para determinar la distancia vertical entre el fondo marino y un punto determinado del casco de la embarcación [6]. Los sonares pueden ser de diferentes tipos, Figura 1.1:

- Sonar activo: Emite la señal acústica desde un transmisor, que se propaga hacia un objeto y se refleja viajando de retorno hacia un receptor.

- Sonar pasivo: No emite ninguna señal acústica. Solo detecta la presencia de objetos que hacen ruido o sonidos como barcos, submarinos e icebergs.

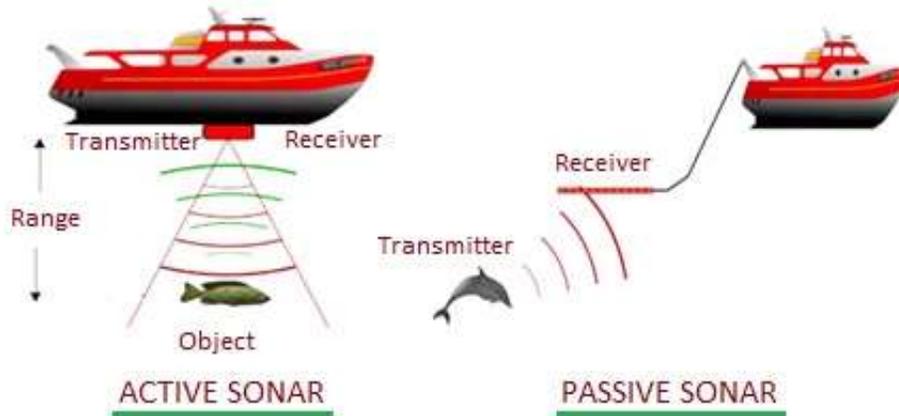


Figura 1.1 Tipos de sonar [7]

1.4.1.1 Aplicaciones de los sonares

Los sonares desempeña un papel importante en el área marítima tanto en la parte científica, militar y de pesca:

- Se emplea en submarinos con el fin de evitar ser detectados, para esto a menudo se aplica un recubrimiento con placas de cauchos que permiten absorber el sonido. Además, son empleados para la comunicación entre submarinos o entre buques.
- Es ampliamente utilizado por los buques dedicados a la pesca, con el fin de detectar el cardumen y peligros en el fondo marino para lograr una navegación segura.
- Se utiliza para el mapeo del fondo marino en los trabajos de batimetría.

1.4.1.2 Domos de sonar: su ubicación y forma

El domo de sonar es un apéndice diseñado para albergar y proteger el sistema de sonar[1]. Según su forma, el domo puede ser: una cúpula conforme es decir que se ajusta a la forma general de la nave, por ejemplo, puede comprender toda la parte delantera del submarino o el bulbo de proa de un buque de superficie; cúpula de apéndice, geometría que sobresale de la forma original del casco y puede ser de tipo parabólico, circular, rectangular, etc. En ambos casos la estructura está

determinada por la distribución de los módulos de transmisión y recepción del sonar. El domo puede estar ubicado en la parte delantera del vehículo marino, buque o submarino, o sobresalir de la forma original del casco, como se muestra en la Figura 1.2. La geometría debe ser capaz de crear un ambiente acústico asegurando que el ruido propio y el ruido inducido por el flujo no afecten la operación del sonar.

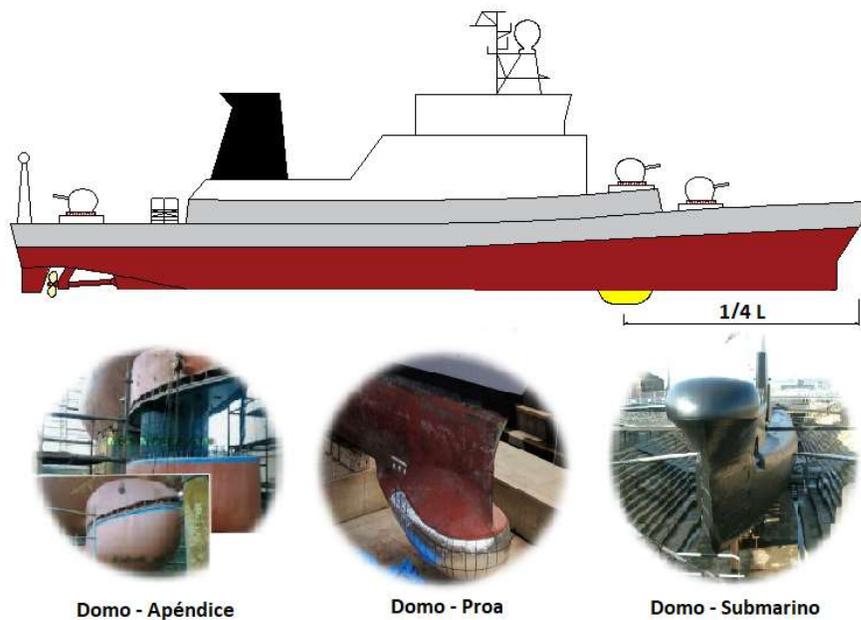


Figura 1.2 Ubicación según la forma del domo [Propia]

1.4.2 Vibraciones y fenómenos acústicos

El sonido es la propagación de cualquier perturbación mecánica en forma de ondas, audibles o no dependiendo de su intensidad y frecuencia, a través de un fluido o un medio elástico, Figura 1.3. Mientras que, el ruido es un subconjunto de sonidos no deseados por la entidad que lo percibe, es decir que cualquier sonido específico puede ser una señal para unos casos y ruido para otros [7]. Existen dos unidades usadas para cuantificar el nivel de sonido existente: el decibelio (dB) expresa en escala logarítmica la razón entre dos potencias o el nivel de sonido. El nivel de sonido es expresado utilizando la presión acústica y esta se mide en micro pascales (μPa)[8].

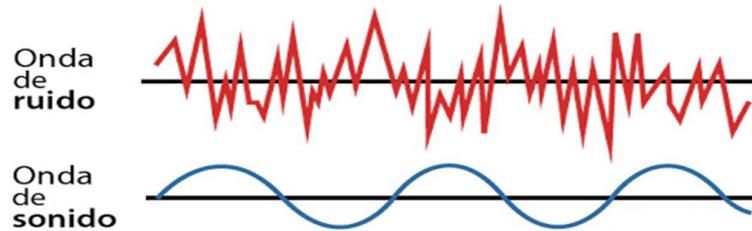


Figura 1.3 Forma de onda Ruido – Sonido [7]

Vibro-acústica es el estudio de las ondas mecánicas en las estructuras y como estas interactúan con los medios adyacentes y se irradian hacia ellos. Se recomienda considerar este fenómeno en el diseño de la geometría del domo para minimizar el ruido generado por el mismo, y que no afecte el rendimiento del sonar [7]. Algunos de los fenómenos acústicos son:

- Efecto de absorción: ocurre cuando una onda sonora llega a una pared rígida y se refleja totalmente, ya que la pared no se mueve y no absorbe energía de la onda, ver Figura 1.4. Este efecto se cuantifica con el coeficiente de absorción que depende del material en que se refleja la onda, este valor se encuentra en el rango de [0-1].

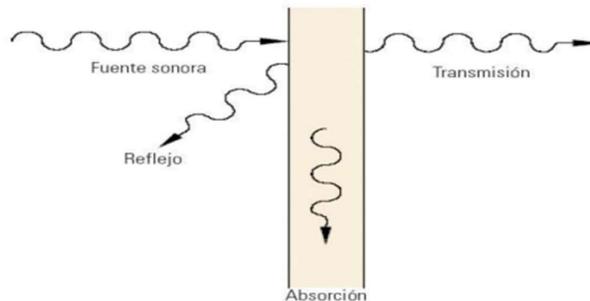


Figura 1.4 Efecto de Absorción [9]

- Efecto de reflexión y refracción: se produce siguiendo las leyes de Snell [9], y es cuando una onda incide sobre una superficie que separa dos medios, parte de la onda se refleja, otra se disipa y un porcentaje se transmite, la velocidad de propagación de la onda cambia al pasar de un medio a otro, ver Figura 1.5. Esto depende de la densidad del medio y la longitud de la onda incidente.

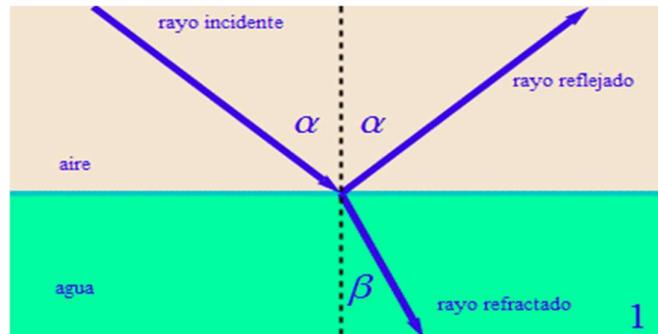


Figura 1.5 Efecto de reflexión y refracción [9]

Algunas de las características vibro-acústicas más relevantes en el diseño de domos que incluyen los fenómenos acústicos, según [10], son:

- Fluctuaciones de presión en la pared del domo
- Transparencia acústica de la pared del domo
- Propiedades de amortiguamiento estructural
- Tamaño y ubicación del domo
- Configuración de la pared del domo

1.4.2.1 Fuentes de ruido

El self-noise o ruido propio producido por las estructuras o los fluidos cercanos al domo son importantes, siendo estas las principales fuentes que degradan el rendimiento acústico del sónar y afectan directamente a la relación señal-ruido al interior del domo. La relación señal – ruido es el margen que existe entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe, y es medido en decibelios [9]. Además, el ruido irradiado por estos agentes contribuye en el aumento del ruido propio generado por el domo, se observa en la Figura 1.6. Los ruidos provenientes del ambiente, sistema eléctrico, golpes de equipos sueltos y de cualquier sistema que provoque una rápida sucesión de sonidos cortos, agudos y fuertes, se desprecian debido a que sus frecuencias se disipan rápidamente en el aire y el casco de la embarcación [6].

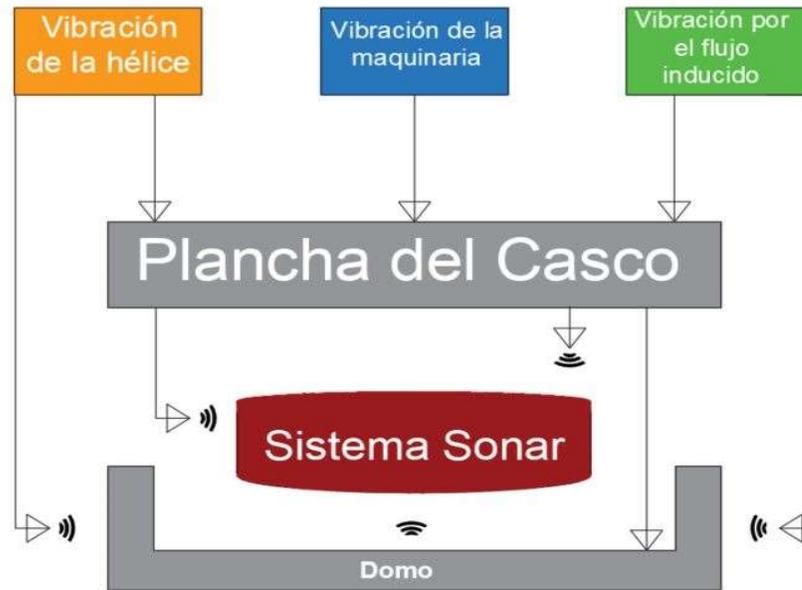


Figura 1.6 Principales fuentes de ruido propio [2]

1.4.2.2 *Ruido generado por maquinaria a bordo*

El ruido de la maquinaria es generado por fuerzas desequilibradas, cuyos pulsos viajan a través de la estructura excitándolos. Este ruido irradia en el agua adyacente y consecuentemente al domo. Las componentes principales del ruido suelen ser hélices de baja frecuencia y fuentes de maquinaria que excitan modos de altas frecuencias, como se observa en la Figura 1.7.

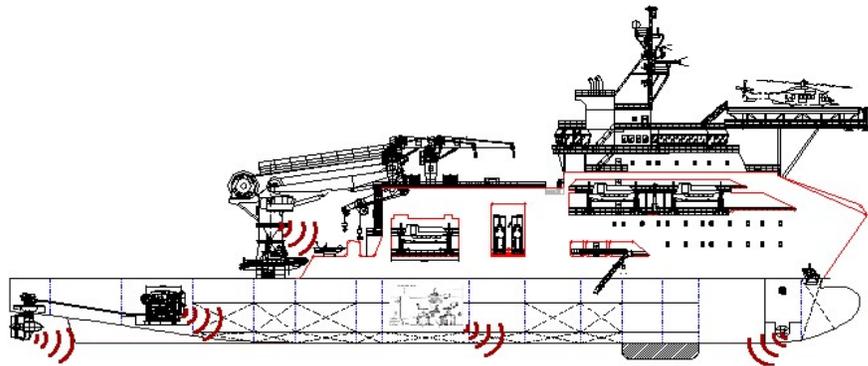


Figura 1.7 Fuentes de ruido generado por maquinarias a bordo [Propia]

1.4.2.3 Ruido generado por el flujo

Es el ruido hidrodinámico causado por el movimiento del buque a través del agua desplazándose con diferentes velocidades, como se observa en la Figura 1.8. Es considerado uno de los mayores generadores de ruido propio que afectan al sonar y es causado por el flujo turbulento de agua generado en la superficie exterior del domo, el cual contiene fluctuaciones de presión aleatorias que pueden producir vibración de la pared.

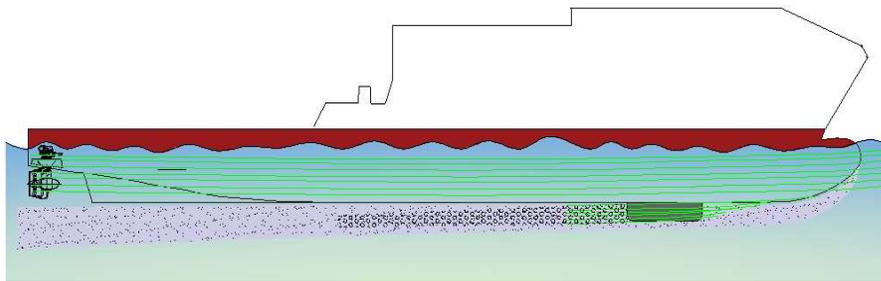


Figura 1.8 Líneas de corriente de flujo sobre el casco y domo [Propia]

1.4.3 Fundamento teórico sobre la estimación del ruido inducido en el sonar

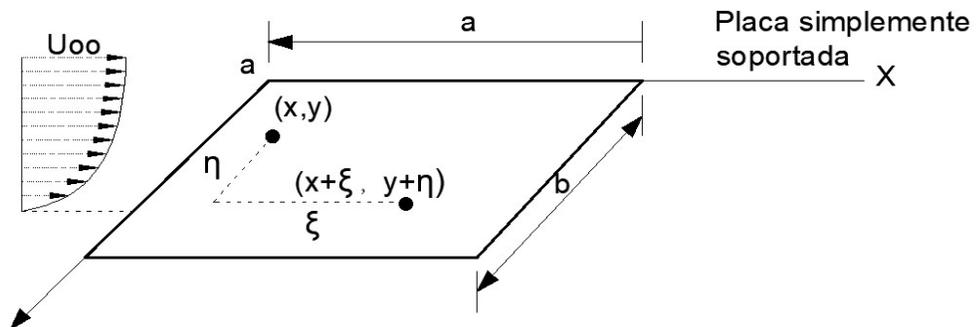


Figura 1.9 Modelo teórico de una placa simplemente soportada [2]

Actualmente se diseñan buques inteligentes, cuyos diseño reduce el ruido que se genera por la hélice y la maquinaria a bordo, quedando solo el ruido que se produce por la vibración de flujo inducido [1]. Este último ocasiona presiones fluctuantes en la capa limite turbulenta, estas presiones excitan las paredes del domo, especialmente a altas velocidades, e induciendo radiación de ruido hacia el interior del domo. En las últimas décadas, la respuesta estructural a la excitación

de flujo turbulento y radiación de ruido ha sido investigada por varios autores [11]–[13], quienes de forma simplificada analizaron la excitación turbulenta de una placa plana, esquematizando las paredes del domo, ver Figura 1.9. Empleando modelos matemáticos que se basaron en experimentos. Por ejemplo, White [13] utilizó las formulaciones basadas en los experimentos de [14], para predecir la respuesta y la radiación de ruido de una placa plana rectangular.

Por otra parte, Bull [12] utilizó los resultados de sus experimentos en las fluctuaciones de la presión de pared turbulenta para derivar un modelo matemático aproximado para la función de correlación cruzada de presión de pared. Luego utilizó este modelo como la excitación en una solución teórica para las estadísticas de desplazamiento de una placa simplemente soportada con excitación de flujo. Para su desarrollo, asumió que la longitud de correlación de la presión de la pared normal a la dirección del flujo era independiente de la frecuencia.

Bhujanga [10], en un esfuerzo por combinar las mejores características de las investigaciones realizadas por [11]–[16], donde se llevaron a cabo el análisis de una solución teórica para las estadísticas de velocidad de la placa simplemente soportada, que es excitada por un flujo turbulento. Conservando los detalles estadísticos de la velocidad de la placa similares a [12], pero con el modelo matemático para la estadística de presión de la pared turbulenta de [14].

1.4.4 Pérdidas de transmisión acústica generadas por el domo

Es importante determinar las pérdidas de transmisión acústica, ya que estas establecen la forma como se debilita la señal a medida que se propaga a través de la geometría del domo, [17] entre estos factores se consideran:

- Reflectividad
- Inserción
- Incidencia
- Transmisión y Vibración Inducida en las paredes del domo

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describirán el funcionamiento y los componentes que integran el sonar EM-302. Además, las especificaciones técnicas del domo de sonar instalado en el BAE Orión. También las formulaciones del fabricante del sonar para determinar las pérdidas por transmisión acústica. Luego se detallarán las ecuaciones a partir de las características vibro-acústicas. Para concluir, se describe la metodología para evaluar el rendimiento del domo de sonar instalado en el Buque BAE Orión.

2.1 Características del Buque Oceanográfico BAE Orión

El buque BAE Orión, mostrado en la Figura 2.1, fue diseñado y construido en el año 1981 por el astillero naval ISHIKAWAJIMA-HARIMA de Japón, y fue incorporado al Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador como el único buque de investigación hidrográfica y oceanográfica en el país. El BAE Orión ha superado las cien mil millas de navegación al realizar más de un centenar de cruceros científicos y campañas Antárticas, aportando en el campo de la investigación y preservando la soberanía marítima nacional [18].



Figura 2.1 Buque de la Armada Ecuatoriana Orión [18]

2.1.1 Especificaciones técnicas

El BAE Orión es un buque multipropósito que cuenta con la capacidad para efectuar trabajos en oceanografía física, levantamientos hidrográficos, prospección sísmica, muestreo de sedimentos y labores de ayuda a la navegación. A continuación, se presentan las dimensiones principales del buque en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Dimensiones Principales del BAE Orión [18]

Eslora total	70.21	[m]
Eslora entre perpendiculares	64.20	[m]
Manga moldeada	10.60	[m]
Puntal	5.40	[m]
Calado total	4.35	[m]
Calado de diseño	3.60	[m]
Velocidad de servicio	12.0	[nudos]
Desplazamiento máximo	1,418	[tons]

2.1.2 Condiciones de navegación

Actualmente, el buque BAE Orión realiza cruceros regionales, como se muestra en la Figura 2.2, al perder la capacidad operativa para realizar expediciones a la Antártida. El BAE Orión navega por debajo de la velocidad de diseño, luego de la repotenciación del año 2008. Como resultado, durante el viaje de ida y retorno la embarcación alcanza una velocidad promedio de 6 a 7 nudos.

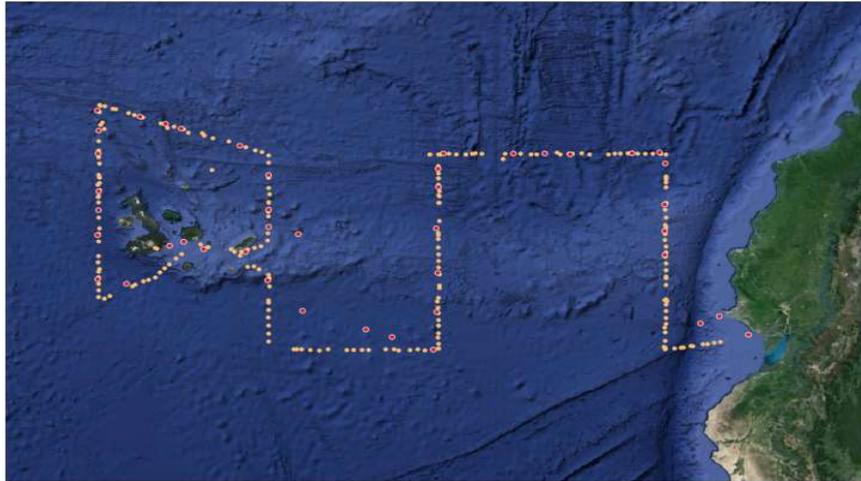


Figura 2.2 Ruta reportada en Cruceros Regionales a Galápagos del 2013 (amarillo) y 2017 (rojo) [4]

2.2 Descripción del Sonar EM 302

En el año 2009, la empresa noruega Kongsberg [5] realiza la instalación del sonar EM 302, en el BAE Orión, como se observa en la Figura 2.3. Este sistema cuenta con alta resolución y precisión, diseñado para mapear fondos marinos de hasta 7000 [m] de profundidad y con una cobertura angular de hasta 140°.



Figura 2.3 Sonar EM 302 instalado en el BAE Orión [4]

2.2.1 Componentes del Sonar EM 302

El sistema de sonar EM 302 está conformado por diferentes unidades, como se muestra en la Figura 2.4, que permiten realizar trabajos de batimetría para obtener una visualización del fondo marino en tres dimensiones (ver APÉNDICE A). Consta de las siguientes unidades:

- I. Interior del domo
 1. Transductor de transmisión
 2. Transductor de recepción
- II. Interior del casco
 1. Transceptor
 2. Unidad de preamplificador y
 3. Estación del operador

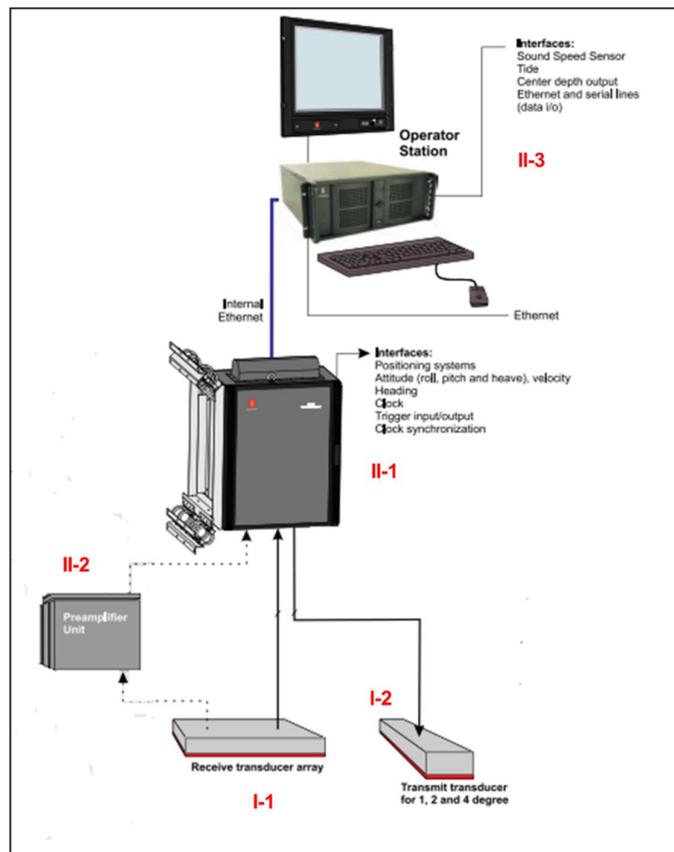


Figura 2.4 Unidades del sistema EM 302 [5]

2.2.1.1 **Funcionamiento del Sonar EM 302**

El sonar EM 302 es controlado mediante el software *Seafloor Information System*, que se encuentra instalado en la estación del operador, donde se configura los parámetros para la operación del sistema sonar según el manual de usuario. Estableciendo las condiciones iniciales el sistema envía una señal eléctrica a través del transductor de transmisión que es convertida en pulso de sonido y se dirigen al fondo marino, una vez que encuentran un objeto rebotan, y son recibidas por el transductor de recepción, como se muestra en la Figura 2.5, el diagrama de funcionamiento del sonar EM-302. Además, (ver APÉNDICE A) se observa en esquema en bloque del sistema sonar instalado en el BAE Orión.



Figura 2.5 Diagrama del funcionamiento del Sonar EM 302 [Propia]

2.2.1.2 **Matrices de Transductores**

Los transductores, mostrados en la Figura 2.7, poseen un arreglo siguiendo la configuración cruzada de Mills en T, como se observa en la Figura 2.6, el cual transmite la señal en sentido longitudinal y recibe en sentido transversalmente. Además, los transductores se encuentran ensamblados en un marco de acero y ubicados horizontalmente en un plano paralelo a la quilla del buque. [19]

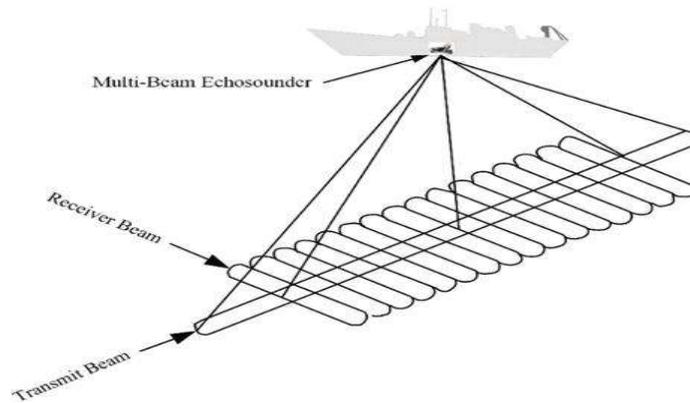


Figura 2.6 Configuración cruzada de Mills en T [19]

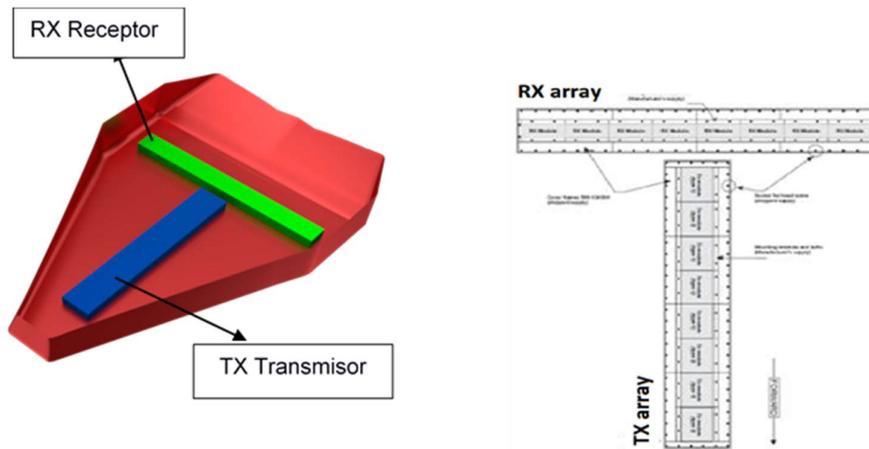


Figura 2.7 Esquema de alineación en T de transductores de transmisión y recepción [5]

En la Tabla 2.2, se muestra las características principales de la matriz de transductores de transmisión y recepción. Además, en la Figura 2.7 se muestran como estos transductores se encuentran instalados en el interior del domo, en el (ver APÉNDICE B) se muestra el arreglo de los transductores de transmisión y de recepción.

Tabla 2.2 Características principales del arreglo, Matriz TX y RX [5]

TX		RX	
Peso	296 [kg] (8 módulos TX)	Peso	152 [kg] (8 módulos RX)
L frame	2992 [mm]	L frame	3271 [mm]
B frame	480 [mm]	B frame	330 [mm]
W frame	185 [kg]	W frame	152 [kg]

2.2.1.3 Módulo de transmisión (TX)

El transductor de transmisión está conformado por 8 módulos TX alineados longitudinalmente como se observa en la Figura 2.8 a lo largo de la eslora. La función de estos módulos es enviar múltiples pulsos de sonido (ver APÉNDICE B). En la Tabla 2.3 se muestran las dimensiones de un módulo de transmisión.

Tabla 2.3 Dimensiones principales de un módulo TX [5]

Longitud	371,5 [mm]
Ancho	350 mm (480 mm con marco)
Altura	160 mm (197 mm con marco)
Peso en aire / agua	37 kg / 17 kg

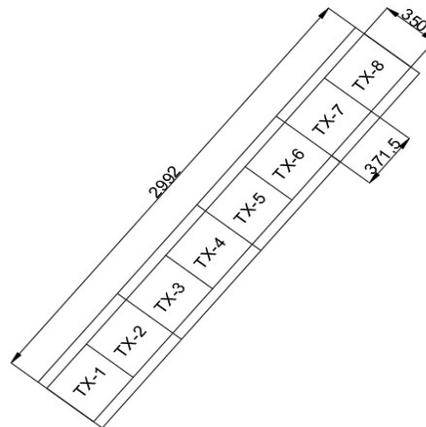


Figura 2.8 Arreglo de los módulos de transmisión TX [5]

2.2.1.4 Módulo de recepción (RX)

El transductor de recepción está conformado por 8 módulos RX alineados en forma transversal como se muestra en la Figura 2.9 a lo largo de la manga, cuya función es recibir la onda sonora y transformarla en una señal normalizada analógica (ver APÉNDICE B). En la Tabla 2.4 se muestran las dimensiones de un módulo de recepción.

Tabla 2.4 Dimensiones principales de un módulo RX [5]

Longitud	406 [mm]
Ancho	300 mm (330 mm con marco)
Altura	160 mm (197 mm con marco)
Peso en aire / agua	19 kg / 6.5 kg

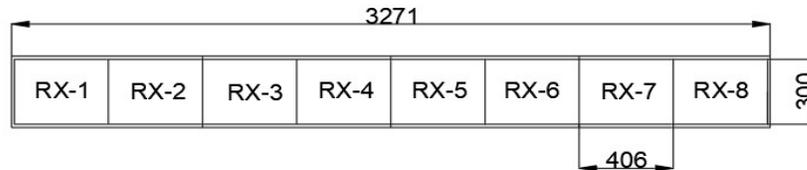


Figura 2.9 Arreglo de los módulos de recepción RX [5]

2.2.1.5 *Parámetros operativos*

Los parámetros de operación más importantes del sistema de sonar se encuentran detallados en la Tabla 2.5. Además, la Figura 2.10 muestra una representación de estos parámetros al instante de su funcionamiento.

Tabla 2.5 Parámetros operativos del Sonar EM 302 [5]

Frecuencia Operativa	30 [kHz]
Rango de Frecuencia	26 – 34 [KHz]
Rango de profundidad	10-7000 [m]
Ancho de franja Max.	8000 [m]
Ancho de Haz	1 [°]
Cobertura	150 [°]

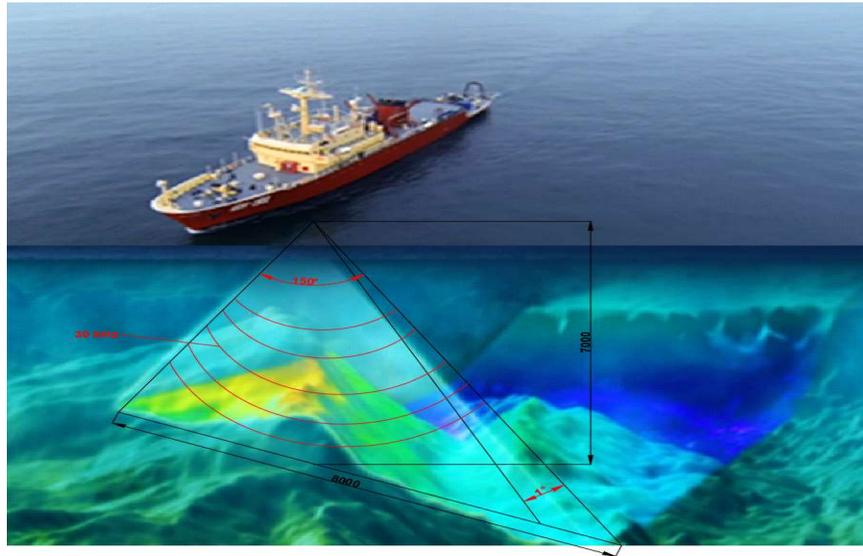


Figura 2.10 Parámetros de operación del sonar [Propia]

2.3 Descripción del Domo instalado en el BAE Orión

Con el propósito de alojar y proteger a los transductores, el domo de sonar fue construido e instalado como se observa en la Figura 2.11. El domo fue diseñado considerando los siguientes requerimientos [5] :

- i. Velocidad de 5 nudos, requerida para el buen funcionamiento del sistema de sonar.
- ii. Dimensiones principales y las formas del casco de la embarcación (ver APÉNDICE C).

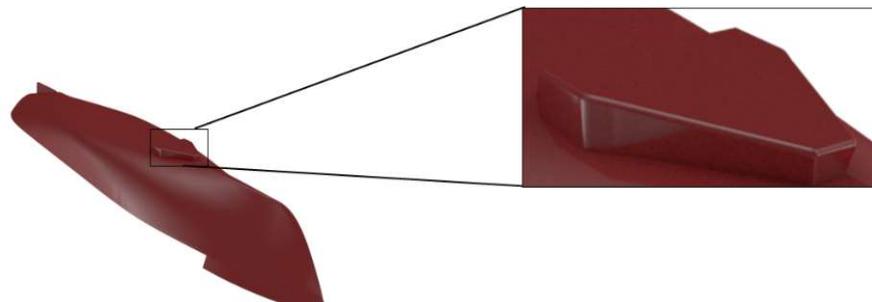


Figura 2.11 Domo instalado en BAE Orión [Propia]

En la Tabla 2.6, se muestra los valores que recomienda [5] para ubicar el domo a un tercio de la eslora, medido desde proa a popa, como se muestra en la Figura 2.12.

Tabla 2.6 Ubicación longitudinal del domo del BAE Orión [Propia]

Eslora total	70.21 [m]
1/3 Eslora recomendado [5]	23.40 [m]
Ubicación actual	19.09 [m]



Figura 2.12 Domo ubicado a $1/3 L$ en el BAE Orión [Propia]

2.3.1 Especificaciones técnicas

El domo se encuentra instalado en la parte más baja del casco, entre las cuadernas # 77 y # 81 coincidiendo con la línea de crujía del buque. Posee una forma triangular apuntando hacia proa debido al arreglo en T de las matrices de transductores instaladas en el interior como se observa en la Figura 2.13.

El arreglo estructural del domo es de tipo transversal, con espaciamento de 0.45 [m] como se observa en la Figura 2.13 y Figura 2.14. Por último, cuenta con una distribución de transductores en su interior según las indicaciones del manual de instalación otorgado por la empresa Kongsberg S.A [5].

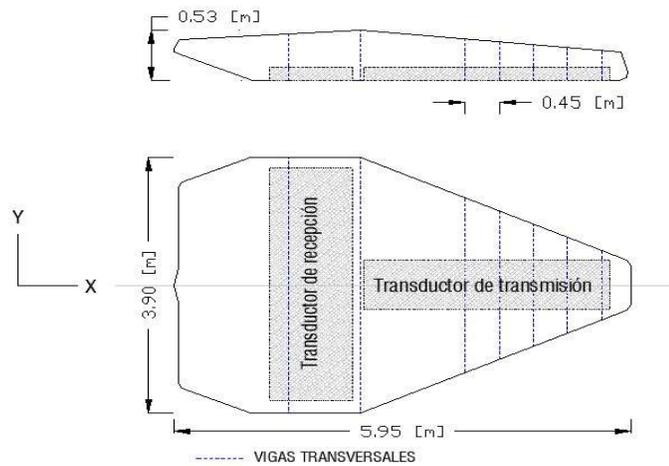


Figura 2.13 Vistas de perfil y superior del Domo [Propia]



Figura 2.14 Arreglo estructural del domo [4]

A continuación, en la Tabla 2.7, se detallan las especificaciones técnicas del domo.

Tabla 2.7 Especificaciones técnicas del domo de sonar [Propia]

Material	Acero naval
Espesor planchaje	9 [mm]
Espaciamiento	0.45 [m]
Ubicación hasta el C.G	19.09 [m] desde proa
longitud	5,95 [m]
Ancho	3,90 [m]
Alto	0,53 [m]

2.3.2 Predicciones acústicas del fabricante

El fabricante [5], proporciona la siguiente formulación para el sonar EM 302, para el nivel de detección del sonar EM 302 .

$$EL = SL - 2TL + BTS \quad (2.1)$$

Donde,

EL: Nivel de eco [dB]

SL: Nivel de la fuente [dB]

TL: Pérdidas por transmisión [dB]

BTS: Fuerza dispersora de retorno [dB]

El nivel de la fuente (SL) es el nivel de intensidad de la señal acústica en referencia a 1 (μPa) constante hasta un punto localizado a 1 metro de distancia del transmisor. Y se calcula a partir de [20], ver la ecuación 2.2:

$$SL = 170.8 + 10 \log_{10} PL + DI \quad (2.2)$$

Donde,

PL: Nivel de presión, medido a 1 m del sonar [μPa]

DI: Índice de directividad de los transductores del sonar [dB]

El Índice de directividad para un transductor plano se lo puede aproximar según el manual del fabricante [5], ver ecuación 2.3:

$$DI = 46.2 - \log_{10} \theta_x \theta_y \quad (2.3)$$

Donde,

θ_x, θ_y : Ancho de haz de transmisión para el eje x, y [$^\circ$].

La pérdida de transmisión (TL) consta de dos partes, una debida a la difusión esférica de la señal y la otra debida a la pérdida de absorción en el agua, y es estimada usando la ecuación 2.4. La Figura 2.15 muestra la variación del coeficiente de absorción en función de la frecuencia.

$$TL = \alpha R + 20 \log_{10} R \quad (2.4)$$

Donde:

α : coeficiente de absorción [dB/Km]

R: rango de operación [Km]

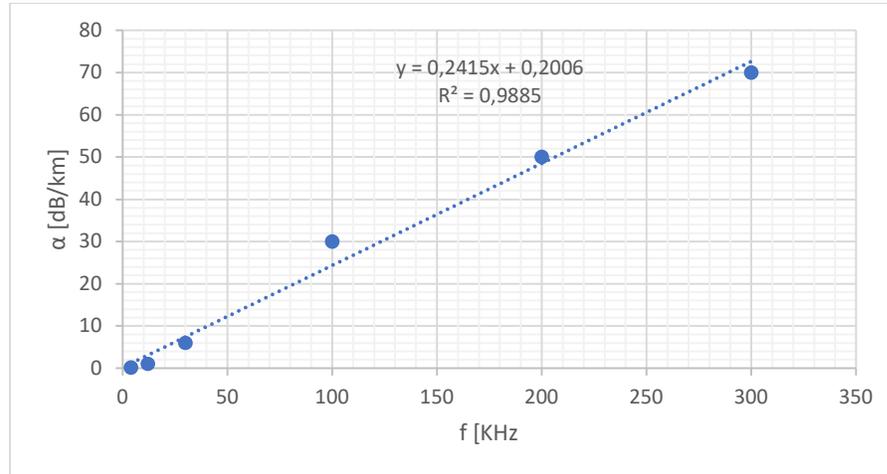


Figura 2.15 Curva de Coeficiente de absorción de la señal acústica [20]

La fuerza dispersora de retorno (BTS) es la suma logarítmica de la fuerza de dispersión de retorno por unidad de área, y esta dependerá tanto de la propiedad reflectante del fondo marino como de la extensión del fondo que contribuye a la señal de retro dispersión en cualquier momento [21], ver ecuación 2.5.

$$BTS = BS + 10 \log_{10}(\theta_x \theta_y R^2) \quad (2.5)$$

Donde,

BS: Coeficiente de retro dispersión del fondo va desde -15 hasta -30 dB, dependiendo del tipo de suelo y de la rugosidad superficial.

θ_x, θ_y : Ancho de haz de transmisión para el eje x, y [°].

2.3.3 Fuentes de ruido que influyen en el sonar

Las principales fuentes de ruido [2] que afectan el rendimiento del sonar, definido como la relación entre la señal transmitida por el sonar y el ruido generado por la geometría del domo. En la Figura 2.16 se muestran las fuentes de ruido más importante, siendo predominante el ruido inducido por flujo. Las presiones fluctuantes de la capa límite turbulenta alrededor del domo, cuando el buque navega a altas velocidades causan la excitación de la pared y altera el ambiente acústico en el interior del domo.

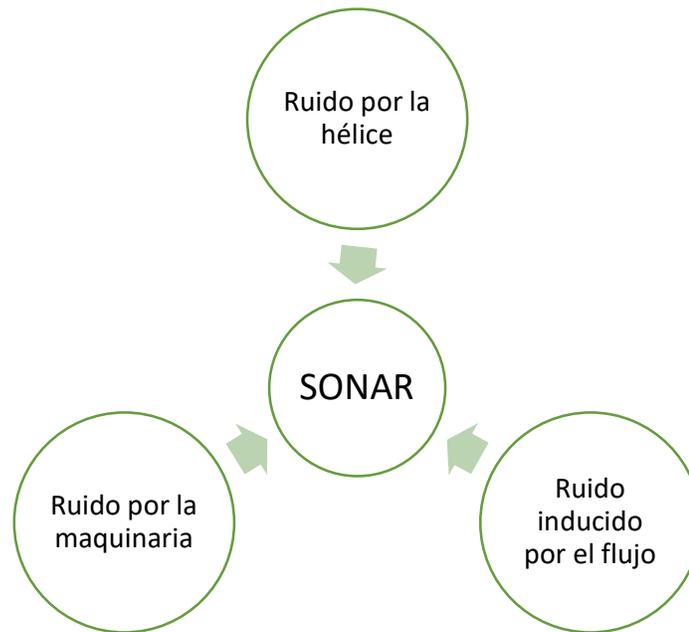


Figura 2.16 Fuentes de ruido que influyen en el sonar [2]

2.4 Características vibro-acústicas de los domos

Para evaluar el diseño del domo se considerara los principios de un buen diseño:

- Que la pared que no pueda ser facilmente excitado por vibracion, y
- Que la pared logre conservar su transparencia acustica en las frecuencias de operación del sonar.

2.4.1 Fluctuaciones de presión de la capa limite en la pared del domo

Para este análisis se considera un domo simplificado de forma rectangular conformado por paredes rigidas [14], como una placa plana simplemente soportada como se observa en la Figura 2.17 . Esta suposición se basa en los datos experimentales de [12], en donde se midieron las densidades espectrales de desplazamiento de placas de acero con espesor variable y bordes fijos, esto se generó como resultado de la excitación turbulenta de la capa limite en un tunel de viento subsonico. Estos valores concuerdan con las estimaciones teóricas, mostrando que a frecuencias superiores que la del sistema sonar, las condiciones de frontera no importan.

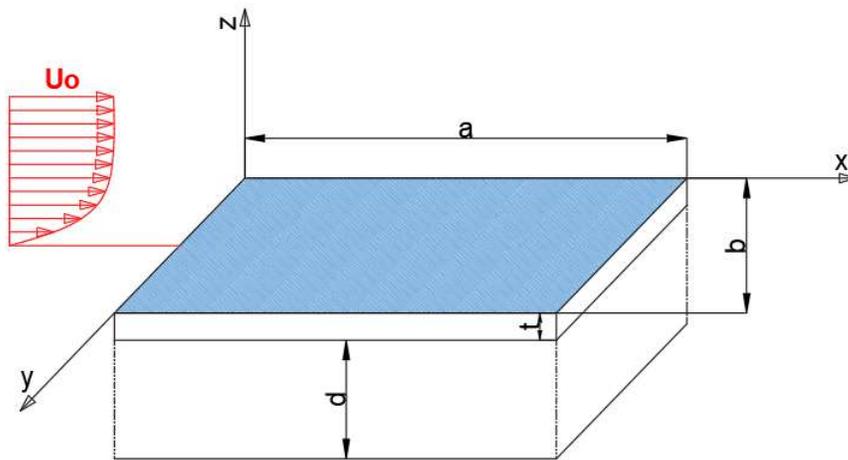


Figura 2.17 Modelo teórico empleado en el análisis. [Propia]

Donde,

a: dimensión longitudinal de la placa en coordenada X

b: dimensión lateral de la placa en coordenada Y.

d: profundidad en la coordenada Z.

U_0 : velocidad del buque-domo

2.4.1.1 Modelo matemático de densidad espectral cruzada de la presión de pared turbulenta

Se considera el flujo turbulento sobre un lado de la placa rectangular simplemente soportada, como se observa en la Figura 2.18.

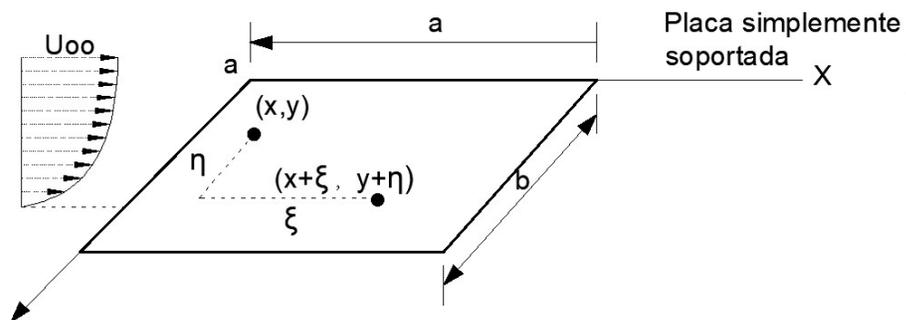


Figura 2.18 Modelo simplificado de la placa plana rectangular [2]

La ecuación 2.6 gobierna el desplazamiento en la dirección z de la placa ocasionado a partir de la excitación de la presión de la capa límite turbulenta en la superficie de la placa [22].

$$D\nabla^4 w + r \frac{\partial w}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P_t(x, y, t) \quad (2.6)$$

Donde,

$$D = \frac{1}{12} \frac{Eh^3}{(1-\gamma^2)} : \text{rigidez a la flexión}$$

h: espesor de la placa

E: módulo de Young del material

γ : relación de Poisson

r: coeficiente de amortiguamiento efectivo de la placa por unidad de área

μ : masa efectiva de la placa por unidad de área

$P_t(x, y, t)$: fluctuaciones de presión acústica actuando como fuerza excitadora

La solución a la ecuación 2.6 para cualquier campo de presión arbitrario se puede determinar mediante la superposición de los modos de vibración, como se observa la ecuación 2.7, correspondientes a la placa en condición libre no amortiguada, con los bordes simplemente soportados. Además, en la ecuación 2.8 se muestra la frecuencia natural del modo m-n de la placa.

- Modos de vibración

$$a_{mn}(x, y) = \frac{2}{\sqrt{ab}} \text{sen} \left(\frac{mny}{a} \right) \text{sen} \left(\frac{mnx}{b} \right) \quad (2.7)$$

- Frecuencia natural del modo m-n de la placa

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{\mu} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]} \quad (2.8)$$

En la ecuación 2.9 se muestra la expresión para la presión aleatoria de excitación en la pared del domo

$$P(x, y, t) = \delta(x - x') \delta(y - y') e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

Donde,

x' , y' : Puntos de aplicación de la presión

$\delta(x)$: Función delta Dirac

Además, la respuesta a la excitación se denota en la ecuación 2.10, y la amplitud a la respuesta de la frecuencia compleja de la placa viene dada por la ecuación 2.11.

$$w(x, y, t) = H(x, x', y, y', \omega) e^{i\omega t} \quad (2.10)$$

$$H(x, x', y, y', \omega) = \frac{1}{\mu} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{mn}(x,y) a_{mn}(x',y')}{[(\omega_{mn}^2 - \omega^2) + \frac{i r \omega}{\mu}]} \quad (2.11)$$

Asumiendo un gradiente de presión medio pequeño y espesor de capa límite turbulenta constante (ver APÉNDICE D), las fluctuaciones de presión de pared turbulenta conformarán un proceso aleatorio homogéneo estacionario [14], es decir que la correlación cruzada de presión será una función solo de la separación de los puntos en el espacio y el tiempo, mas no de la ubicación específica de los puntos, como se muestra en la ecuación 2.12.

$$S_{pp}(\omega, \xi, \eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau, \xi, \eta) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.12)$$

Donde,

$R(\tau, \xi, \eta)$: función de correlación cruzada de presión

Para representar la densidad espectral cruzada de presión de pared turbulenta $S_{pp}(\omega, \xi, \eta)$ se implementará el modelo matemático de [14], se muestra la ecuación 2.13.

$$S_{pp}(\omega, \xi, \eta) = \phi(\omega) A\left(\frac{\omega\xi}{U_c}\right) B\left(\frac{\omega\eta}{U_c}\right) e^{\left|\frac{-i\omega\xi}{U_c}\right|} \quad (2.13)$$

Donde,

$\phi(\omega)$: es la densidad espectral de la presión de pared turbulenta.

$A\left(\frac{\omega\xi}{U_c}\right) = e^{-0.115 \left|\frac{\omega\xi}{U_c}\right|}$: dependencia $S_{pp}(\omega, \xi, \eta)$ en coordenada x

$B\left(\frac{\omega\eta}{U_c}\right) = e^{-0.7 \left|\frac{\omega\eta}{U_c}\right|}$: dependencia de $S_{pp}(\omega, \xi, \eta)$ en coordenada y

U_c : es la velocidad de convección media de capa límite turbulenta: $U_c = 0,65U_0$

Para representar la densidad espectral de presión de la pared turbulenta $\phi(\omega)$ se eligió la propuesta por [23] que se muestra en la 2.14.

$$\Phi(\omega) = \begin{cases} C & \text{para } \omega \leq 1.932 \frac{U_c}{\delta^*} \\ 2C \left(\frac{\omega \delta^*}{U_o} \right)^{-3} & \text{para } \omega > 1.932 \frac{U_c}{\delta^*} \end{cases} \quad (2.14)$$

Donde,

$$C = 0.75 * 10^{-5} \alpha^2 \rho_f^2 U_o^3 \delta^*$$

α : constante adimensional, 1 para agua y 3 para aire

ρ_f : densidad del fluido

$$\delta^* = \frac{0.048x}{(U_o * x / \nu)^{1/5}}: \text{espesor de desplazamiento de capa limite turbulenta}$$

ω : frecuencia, $2\pi f$

Combinando las ecuaciones 2.14 y 2.13, se obtiene la densidad espectral cruzada de la presión de la pared turbulenta, $S_{pp}(\omega, \xi, \eta)$, como se muestra en la ecuación 2.15 la cual es empleada más adelante para la estimación de la respuesta (ver APÉNDICE D).

$$S_{pp}(\omega, \xi, \eta) = \begin{cases} C * \left(e^{-0.115 \left| \frac{\omega \xi}{U_c} \right|} \right) \left(e^{-0.7 \left| \frac{\omega \eta}{U_c} \right|} \right) e^{-\frac{i\omega \xi}{U_c}}, & \text{para } \omega \leq 1.932 \frac{U_c}{\delta^*} \\ 2C \left(\frac{\omega \delta^*}{U_o} \right)^{-3} \left(e^{-0.115 \left| \frac{\omega \xi}{U_c} \right|} \right) \left(e^{-0.7 \left| \frac{\omega \eta}{U_c} \right|} \right) e^{-\frac{i\omega \xi}{U_c}}, & \text{para } \omega > 1.932 \frac{U_c}{\delta^*} \end{cases} \quad (2.15)$$

2.4.1.2 Modelo matemático de la densidad espectral cruzada de la aceleración de la placa

Siguiendo el modelo matemático anterior e integrando las ecuaciones dadas se obtiene la respuesta resultante de la pared del domo descrita como la función de densidad espectral cruzada de desplazamiento, como se muestra en la ecuación 2.16.

$$S_{dd}(x, \xi, y, \eta, \omega) = \int_0^a \int_0^b \int_0^a \int_0^b S_{pp}(\xi', \eta', \omega) H(x, x', y, y', \omega) x H(x + \xi, y + \eta, x' + \xi', y' + \eta', \omega). dx' dy' d\xi' d\eta' \quad (2.16)$$

Donde,

$S_{pp}(\xi', \eta', \omega)$: función de densidad espectral cruzada de presión turbulenta.

$H(x, x', y, y', \omega)$: es la función de respuesta de frecuencia para placas rectangulares simplemente soportadas.

La función de densidad espectral cruzada de desplazamiento se interpreta físicamente como la respuesta de desplazamiento de la placa en (x, y) a una

fuerza puntual en (x', y') que varía sinusoidalmente con la frecuencia. Reemplazando las ecuaciones 2.7, 2.8, 2.11 y 2.15 en la ecuación 2.16 se obtiene una expresión en forma integral. W. Strawderman [22] realizó la integración y obtuvo la expresión para la densidad espectral cruzada de desplazamiento de la placa, al multiplicarlo por ω^4 y establecer ξ, η igual a cero, produce la expresión para la función de densidad espectral de potencia de aceleración de placa, como se muestra en la ecuación 2.17.

$$S_{aa}(x, y, \omega) = \omega^4 \Phi(\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{q\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) G_{ns} W_{mnqs}}{T_{mn} \cdot T_{qs} \cdot P_s \cdot P_n \cdot R_m \cdot R_q} \right] \quad (2.17)$$

Donde,

$S_{aa}(x, y, \omega)$: es la función de densidad espectral cruzada de aceleración.

$\Phi(\omega)$: es la función de densidad espectral de potencia de presión turbulenta.

T_{mn}, P_n, R_m, G_{ns} y W_{mnqs} (ver APÉNDICE D).

Dado que el sistema de sonar opera a una frecuencia en particular y con cierto ancho de banda, [2] menciona que es suficiente si se calcula la respuesta de la aceleración de la pared del domo en la región del ancho de banda del sistema de sonar. Sin embargo, a altas frecuencias los modos de una placa están densamente distribuidos a diferencias de las bajas frecuencias donde está bien separados. [2], recomienda calcular la densidad modal y multiplicar a la amplitud de la aceleración cuadrática media. Como se muestra en la ecuación 2.18 la expresión para obtener el número medio de modos en una banda de frecuencia.

$$\Delta N = \frac{\sqrt{3}ab}{c_1 H} \Delta F \quad (2.18)$$

Donde,

ΔN : Número medio de modos

$c_1 = (\sqrt{12}/H) \sqrt{D/\mu}$: Coeficiente que depende de la rigidez flexural

H : profundidad de inmersión [m]

ΔF : Banda de frecuencia [kHz]

2.4.2 Transparencia acústica de la pared del domo

La transparencia acústica de un domo debe ser máxima en dirección de la transmisión y recepción de la señal, en función de la frecuencia de funcionamiento del sistema sonar, y al mismo tiempo debe ser mínima en la dirección del ruido que intenta ingresar al domo, como se observa en la Figura 1.9. Los parámetros principales que afectan al coeficiente de transmisión o transparencia acústica son:

- Tipo de material de la pared del domo,
- Espesor de la pared del domo,
- Dirección de incidencia,
- Geometría del domo,
- Tipo de estructura de la pared.

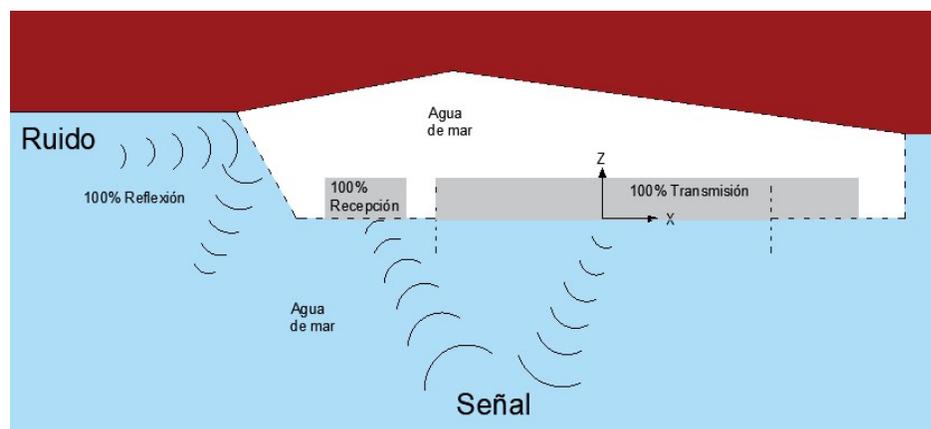


Figura 2.19 Dirección de transmisión y recepción de la señal [Propia]

La transparencia acústica es el coeficiente de transmisión de la pared del domo según el tipo de material. Esta característica puede ser cuantificada como la razón entre la presión incidente y la presión transmitida. En domos de sonar tipo apéndice generalmente se analiza la transmisión y reflexión de la señal en una interfaz entre fluidos y sólidos, como se muestra en la Figura 2.20.

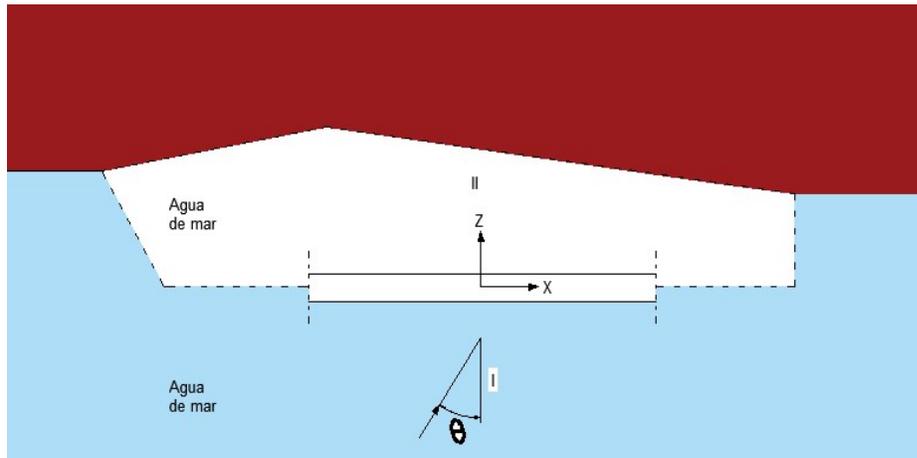


Figura 2.20 Interfaz, Agua de mar – Placa de acero- Agua de mar [Propia]

Para el modelo de placa plana, las ecuaciones 2.19 y 2.20 representan la presión reflejada y transmitida en función de la presión incidente, estas a su vez dependen de la frecuencia de operación del sonar y del ángulo de incidencia θ . Mientras que, la ecuación 2.21 muestra una expresión simplificada para estimar el coeficiente de transmisión de la placa frente a ondas llegando con un ángulo de incidencia normal, 0° .

La presión reflejada:

$$P_R = \frac{\left\{ iP_i kh \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{sen}^4 \theta \right] \cos \theta \right\}}{\left\{ ik \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{sen}^4 \theta \right] \cos \theta + 2 \right\}}, \quad [Pa] \quad (2.19)$$

La presión transmitida:

$$P_T = \frac{2P_i}{\left\{ ikh \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{se}^4 \theta \right] \cos \theta + \right\}}, \quad [Pa] \quad (2.20)$$

Coeficiente de transmisión:

$$\frac{P_T}{P_I} = \frac{2\rho c_{water}}{2\rho c_{water} + i\omega m} \quad (2.21)$$

Donde:

$P_i = 2\rho c_{\text{water}} + i\omega m$: presión incidente

k : número de onda del fluido (ω/c)

h : espesor de la placa

ρ_s : densidad de la estructura

ρ : densidad del fluido

ω : frecuencia angular de la onda incidente

ω_c : frecuencia de coincidencia de la placa

m : $\rho_s * h$, masa por unidad de área del material.

θ_i : ángulo incidente

X, Z : coordenadas de referencia del campo acústico.

2.4.2.1 Pérdidas por transmisión, reflexión e inserción de la señal – ruido

La pérdida por transmisión nos indica la capacidad que tiene la pared del domo para no transmitir ondas sonoras. Posee un valor distintivo para cada frecuencia en estudio, amplitud que a su vez varía según el ángulo de incidencia medido respecto del vector normal a la superficie. Las ecuaciones 2.22, 2.23 muestran una función simplificada para cuantificar las pérdidas por transmisión a incidencia normal y aleatoria, [6].

- Transmisión a incidencia normal

$$TL_o = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c_{\text{water}}} \right)^2 \right] , \quad [dB] \quad (2.22)$$

- Transmisión a incidencia aleatoria

$$TL \approx TL_o - 10 \log(0.23TL_o), \quad [dB] \quad (2.23)$$

La ecuación 2.24 nos indica la pérdida por reflexión como la relación logarítmica expresada en decibelios entre la energía acústica reflejada y la energía acústica incidente [6].

- Reflexión:

$$R = 20 \log \frac{P_R}{P_I} , \quad [dB] \quad (2.24)$$

La pérdida por inserción es la relación logarítmica expresada en decibelios entre la energía acústica incidente sobre la pared y la energía acústica transmitida

(ecuación 2.25). Es un término que describe el cambio de la presión sonora antes y después de incorporar una inserción, es decir la placa de acero, [6].

- Inserción:

$$I = 20 \log \left| \frac{P_T}{P_I} \right| , \quad [dB] \quad (2.25)$$

Dado que la frecuencia acústica es inversamente proporcional al espesor de la pared del domo, se debe encontrar un equilibrio entre el espesor requerido para una alta transparencia acústica y el espesor requerido para que la pared del domo sea mecánicamente resistente para soportar las fuerzas hidrodinámicas resultantes a la velocidad máxima del buque y en todas las condiciones climáticas. Por lo que, si se desea tener una pérdida de transmisión a incidencia normal menor a 3 [dB], el producto de frecuencia acústica-espesor de un domo fabricado en acero (ecuación 2.26) debe estar por debajo de 2.4 [KHz-in], como se muestra en la Figura 2.21, [6].

$$f * h = 12.53 * c_{water} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \sqrt{10^{\frac{TL}{10}} - 1} , \quad [KHz * in] \quad (2.26)$$

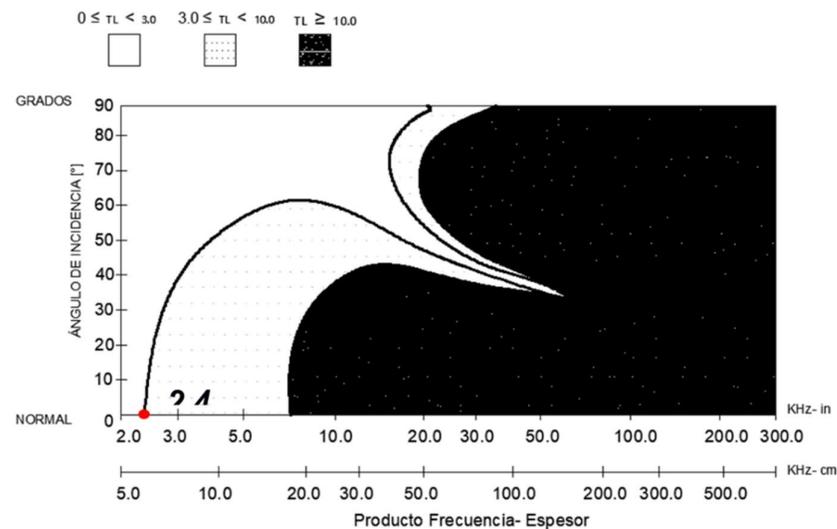


Figura 2.21 Variación del espesor en función de la frecuencia acústica con pérdidas de transmisión a incidencia normal menor a 3 [dB] para una placa de acero, [6]

2.4.2.2 Ángulo crítico o coincidente

Se denomina ángulo crítico cuando la longitud de onda acústica y la longitud de onda según el modo de vibración básico (compresión/ tensión, corte y flexión) de la placa coinciden, ver Figura 2.22. Es decir que para una frecuencia dada tendremos la siguiente igualdad:

$$\lambda_m \text{sen}(\theta) = \lambda_{acústica}$$

La ecuación 2.27 muestra una función que define la longitud de onda como la relación entre la velocidad de la señal en el medio y su frecuencia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad , \quad [\text{m}] \quad (2.27)$$

Reemplazando la ecuación 2.27 en la igualdad definida anteriormente, resulta:

$$\frac{c_m}{f} \text{sen}(\theta) = \frac{c_a}{f} \quad , \quad [\text{m}] \quad (2.28)$$

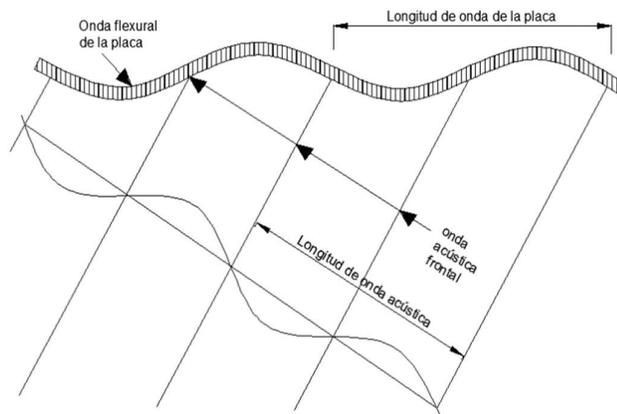


Figura 2.22 Efecto de coincidencia [6]

Por debajo de la frecuencia de coincidencia, el mecanismo que predomina la transmisión del sonido a través de las placas involucra ondas longitudinales. Estas ondas son de flexión y se vuelven dominantes en la transmisión de la pared para frecuencias superiores de $f_c/2$. Si se reemplaza la ecuación 2.29 referente a la velocidad de onda flexural de la placa en la ecuación 2.28 a un ángulo de incidencia de 90° , obtendremos por despeje la frecuencia crítica, f_c (ver APÉNDICE D), ecuación 2.30.

$$c_f = \sqrt{\frac{\omega c_p h}{\sqrt{12}}} = c_a \quad , \quad [\text{m/s}] \quad (2.29)$$

$$\omega_c = \frac{c_a^2 \sqrt{12}}{c_p h} = 2\pi f_c \quad , \quad [\text{rad/s}] \quad (2.30)$$

Donde,

Velocidad de propagación de compresión del sonido,

$$C_p = (E/\rho_s)^{1/2} \quad , \quad [\text{m/s}] \quad (2.31)$$

Velocidad de la onda de corte del material,

$$C_s = (G/\rho_s)^{1/2} \quad , \quad [\text{m/s}] \quad (2.32)$$

h: espesor de la pared [m]

La transparencia acústica de la pared del domo varía según la dirección de la onda de sonido influenciada por las frecuencias críticas de los modos de vibración de la placa, [6]. En el caso de onda de flexión ver ecuación 2.31.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{1/2} \quad (2.33)$$

2.4.3 Tamaño y ubicación del domo

El tamaño del domo debe seleccionarse de tal manera que deje suficiente espacio libre entre la pared del domo y el conjunto de transductores para permitir que la radiación de campo cercano decaiga adecuadamente. Con el objetivo de evitar burbujas de aire en la cara del transductor que está en contacto con el agua, el fabricante Kongsberg [5] recomienda ubicar el domo en la zona de proa de la embarcación, a una distancia mínima de 10 m y máxima de 1/3 la eslora del buque como se observa en la Figura 2.23.

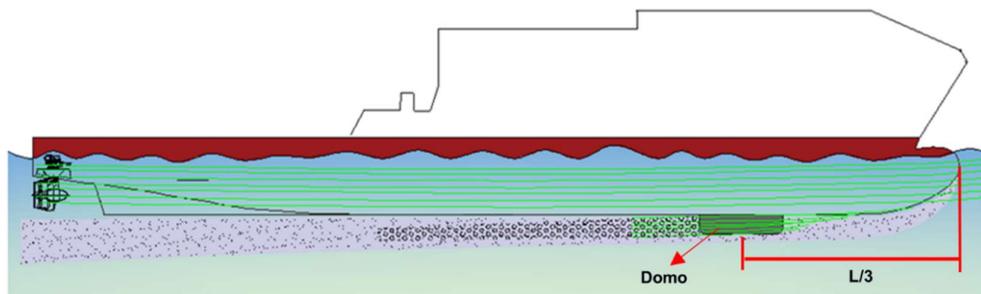


Figura 2.23 Ubicación del domo [Propia]

2.5 Metodología de evaluación del rendimiento del domo de sonar

Para evaluar el ambiente acústico en el interior del domo se estableció la siguiente metodología como se observa en la Figura 2.24. Primero se identificaron las dimensiones del domo y los parámetros operativos del sistema de sonar. Posteriormente, se determinaron las predicciones acústicas del fabricante y rangos permisibles en referencia a las pérdidas por transmisión acústica. Luego se identificaron las características vibro-acústica para el diseño del domo [10], que influyen en el rendimiento del sistema de sonar, se calculó las pérdidas que estas características generan empleando las formulaciones descritas por [2], [6], [22]. Después se valoró la influencia de las pérdidas realizando la comparación con las predicciones del fabricante. Finalmente, se verificó si la influencia de las pérdidas está dentro de los rangos permisibles.

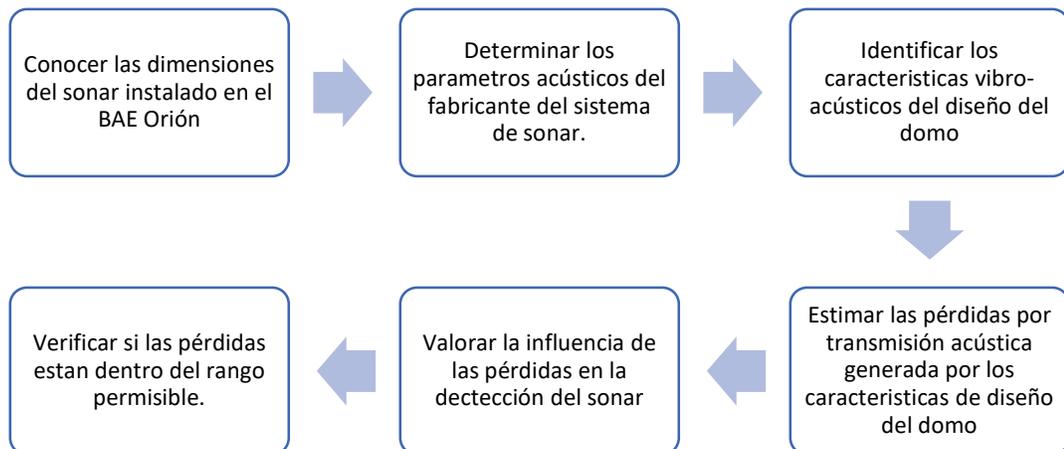


Figura 2.24 Metodología para evaluar el ambiente acústico del sonar [10]

CAPÍTULO 3

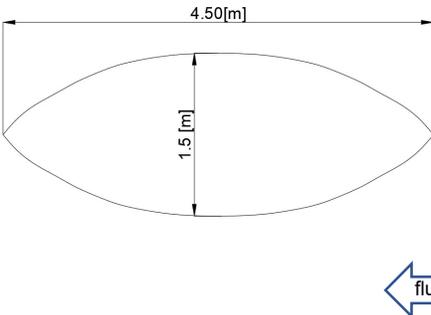
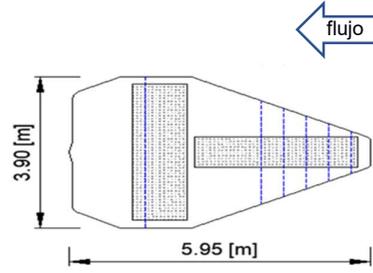
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados de la evaluación para las características vibro-acústicas comparando con los resultados presentados en la referencia [2], [24]. Luego las estimaciones generadas por pérdidas de transmisión acústicas, para el domo instalado en el BAE Orión. Además, se presenta la variación entre los resultados obtenidos de las predicciones teóricas y del fabricante. Finalmente, se realiza la estimación de la calidad acústica en el interior del domo instalado en el BAE Orión.

3.1 Evaluación de las características vibro-acústicas

Como primer punto se validó la metodología empleada en este trabajo comparando la geometría del domo instalado en el BAE Orión con la geometría del domo parabólico empleada en el trabajo de [2], como se observa en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Dimensiones de los domos analizados [Propia]

Domo Parabólico		Domo instalado BAE Orión	
			
Dimensiones			
t[mm]	15	t[mm]	9
E[kg/m ²]	1.32E+09	E[kg/m ²]	2.11E+10
ρfibra[kg/m ³]	1570	ρacero[kg/m ³]	7800

Las pérdidas de transmisión por la vibración del flujo inducido, en la pared del domo empleando fueron determinadas usando la ecuación 2.17. Para estimar la

respuesta de la pared se obtuvo la curva del RMS de la aceleración vs el porcentaje de la longitud de la pared para diferentes velocidades de la embarcación, las cuales van desde 3.5 a 20 [nudos] (ver APÉNDICE D), como se observa en la Figura 3.1, estas siguen la tendencia a los resultados presentados por [2], además no son iguales ya que el domo analizado por Rao estaba construido en fibra de vidrio, mientras que el analizado en este trabajo es de acero naval, esta diferencia de materiales no afecta, siempre que se considere un espesor de pared adecuado para superar las fuerzas hidrodinámicas a la que es sometida el domo.

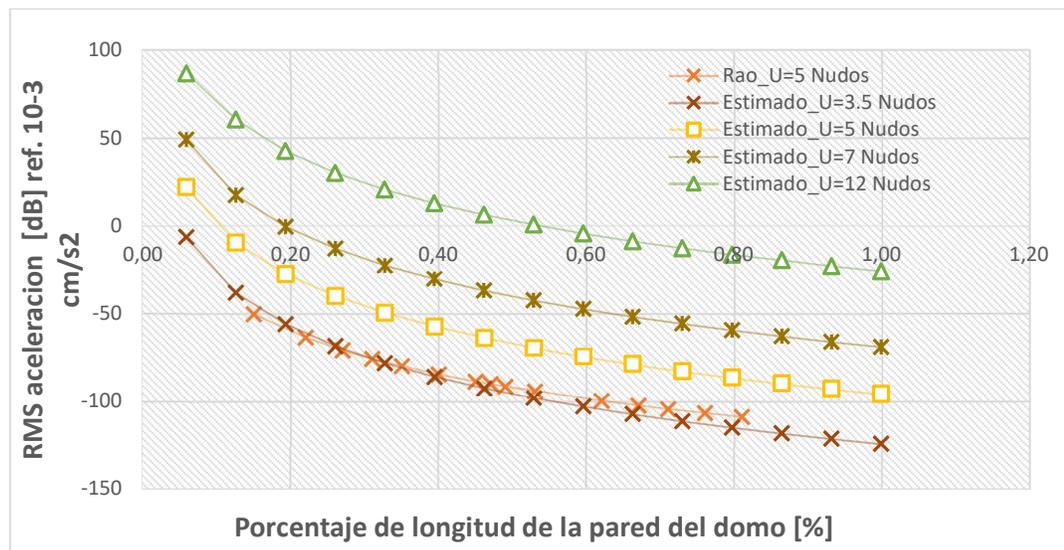


Figura 3.1 RMS de la aceleración vs porcentaje de la longitud del domo [propia]

En la Figura 3.2 se muestra las curvas del RMS de la aceleración de la pared del domo vs las diferentes velocidades del buque, para un porcentaje del 45% la longitud de la pared. Los valores de la respuesta se estimaron empleando la frecuencia de operación del sistema sonar, que es de 30 [kHz]. Además, las curvas siguen el mismo comportamiento que el estimado por [2], validando así nuestros resultados. Además, se consideró importante analizar a 5 [nudos] ya que es la velocidad de navegación del BAE Orión con la que opera el sonar, obteniendo valores negativos en la respuesta de la aceleración, los cuales nos

indican que a bajas velocidades el nivel de ruido generado por toda la longitud de la pared del domo es extremadamente bajo siendo este silencioso.

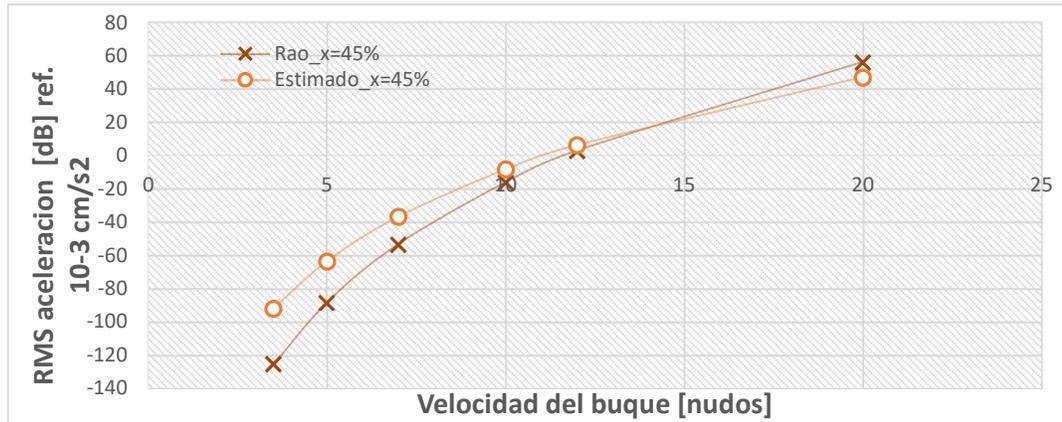


Figura 3.2 RMS aceleración de la pared vs velocidad del buque al 45% la longitud de la pared del domo [Propia]

También en la Figura 3.3 se muestra la respuesta de la pared vs la velocidad del buque para el 6%, 53% y 93% de la longitud de la pared del domo, como se observa al 6% de la longitud de pared se obtiene una mayor respuesta en comparación con el 53% y 93%, esto se debe a que al 6% de la longitud de la pared del domo está más próximo con la entrada del flujo que llega al domo (ver APÉNDICE D).

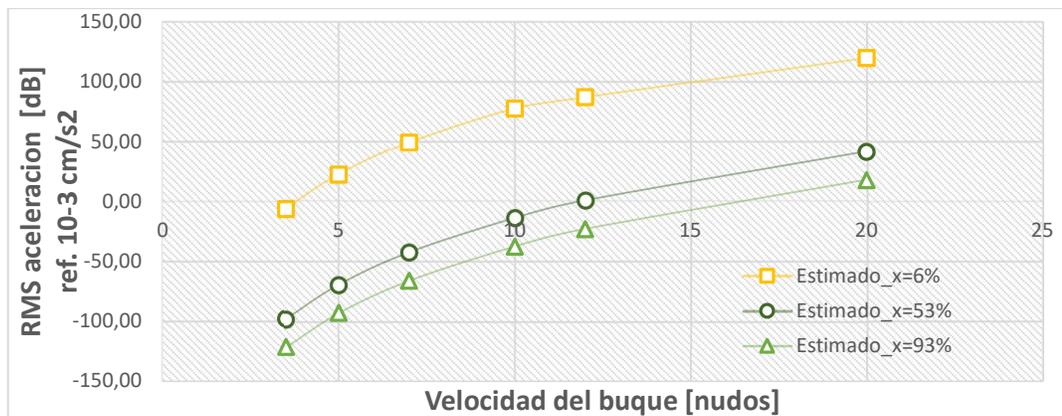


Figura 3.3 RMS aceleración de la pared vs velocidad del buque a 6%, 53% y 93% la longitud de la pared del domo [Propia]

Finalmente se integró los valores del RMS de la aceleración a lo largo de la pared del domo, obteniendo la respuesta general por el domo cuando es excitado por el flujo de la embarcación a diferentes velocidades, como se observa en la Figura 3.4 se incluyó la velocidad de 5 [nudos], ya que es la condición de navegación, obteniéndose una respuesta de -301.71 [dB]. Además, nos indica que a medida que aumenta la velocidad del buque la pared del domo genera ruido, y este influye en el rendimiento del sistema sonar.

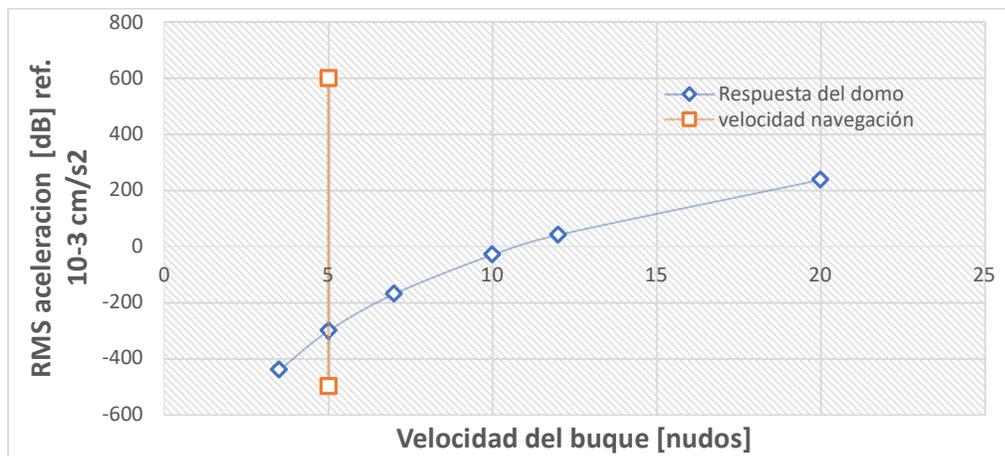


Figura 3.4 RMS de la aceleración total del domo vs velocidad del buque operando a 30kHz [Propia]

Como segundo punto se analizó la transparencia acústica de la pared del domo, para conocer su comportamiento en presencia de ondas incidentes normales o aleatorias a la placa. El análisis inicia dividiendo la geometría del domo en zonas. Como se observa en la Figura 3.5, las zonas en rojo están expuestas a fuentes de ruido como el movimiento en proa, cavitación, generación de burbujas en superficies, hélice y ruido inducido por flujo, mientras que la zona gris representa a la placa cuyo vector normal a la superficie está en dirección a la frecuencia de operación del sonar.

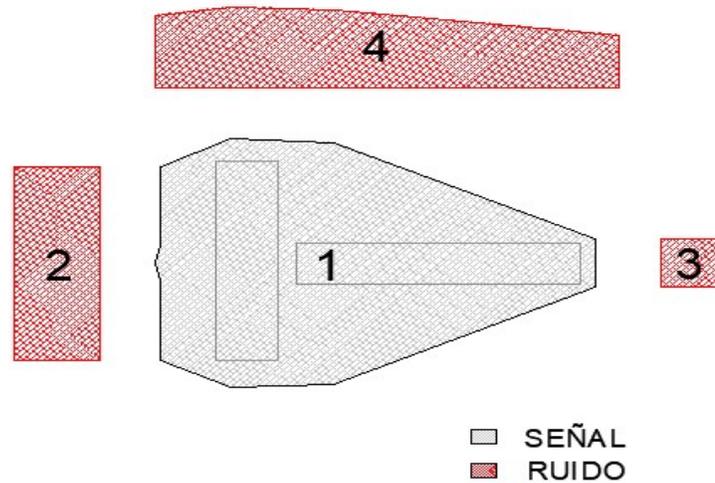


Figura 3.5 Zonas de señal-ruido en el domo de sonar BAE Orión, 2D [Propia]

Para identificar las frecuencias críticas se analizó la velocidad de propagación del sonido en el medio bajo la configuración Agua de mar – Placa – Agua de mar representada en la Figura 2.20, y los diferentes modos de vibración (c water, cf, cp, cs). A continuación, la Tabla 3.2 muestra los parámetros requeridos para la evaluación.

Tabla 3.2 Parámetros principales requeridos en la evaluación de la pared del domo [Propia]

Descripción	Unidad	Cantidad
Módulo de Young _acero	E[kg/m ²]	2,11E+10
Coefficiente de Poisson_ acero	v [adi]	3,20E-01
Módulo de corte _ acero	G [Kg/m ²]	7,99E+09
Densidad de masa _ acero	ρ_{steel} [kgm/m ³]	7,85E+03
Masa x unidad de área _ acero	m[kgm/m ²]	7,07E+01
Espesor del planchaje	h [m]	9,00E-03
Densidad de masa _ fluido	ρ_{water} [kgm/m ³]	1,02E+03
Velocidad del sonido _ fluido	c water [m/s]	1,50E+03
Velocidad del sonido _	cp [m/s]	5,13E+03
Compresión		
Velocidad del sonido _ Corte	cs [m/s]	3,16E+03

La Figura 3.6 muestra la variación de longitud de onda para cada modo de vibración, considerando una placa plana de acero de 9[mm] de espesor. Estas curvas son evaluadas empleando la ecuación general 2.27, la cual toma como referencia las ecuaciones 2.29, 2.31 y 2.32 para evaluar la velocidad de onda según los modos de flexión, compresión/ tensión y corte respectivamente.

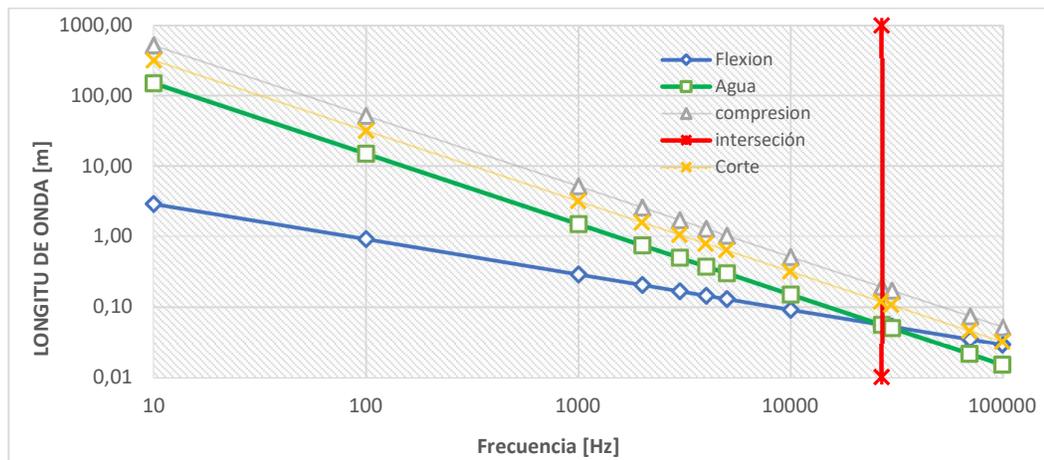


Figura 3.6 Longitud de onda vs Frecuencia acústica [Propia]

La frecuencia crítica por flexión también se puede determinar mediante la intersección entre las curvas de onda flexural y acústica aplicando la ecuación 2.28. Los ángulos críticos calculados a partir de la ecuación 2.33, fueron evaluados en la frecuencia del sonar como se muestran en la Tabla 3.3. (ver APÉNDICE D)

Tabla 3.3 Frecuencia de coincidencia y ángulos críticos según los modos básicos de vibración de una placa de acero [Propia]

Frecuencia crítica_ flexión	f_c [KHz]	27
Frecuencia de operación del sonar	f [KHz]	30
Ángulo crítico_ flexión	[°]	71
Ángulo crítico_ Compresión	[°]	17
Ángulo crítico_ Corte	[°]	28

El modo de vibración por flexión es el más dominante en la transmisión de la pared, razón por la cual se recomienda que la frecuencia crítica este por encima

de la frecuencia de funcionamiento del sonar. En este caso f_c está por debajo de la frecuencia de interés 30[KHz], esto implica que existen ángulos críticos o de coincidencia (ecuación 2.33), en donde ondas de sonido a determinada frecuencia acústica podrán activar el modo de vibración por flexión y transmitirse totalmente a través de la pared del domo. La curva mostrada en la figura 3.7 representa el ángulo crítico respectivo para cada frecuencia acústica $> f_c$.

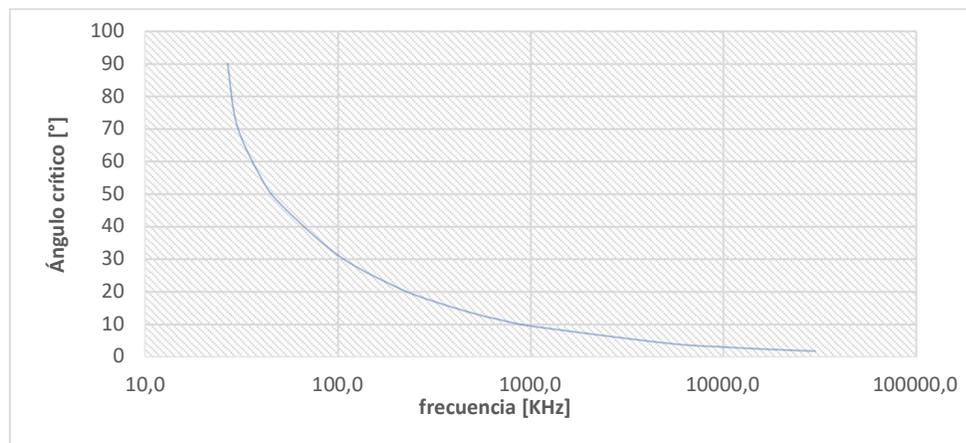


Figura 3.7 Ángulo crítico de flexión vs $f > f_c$ [Propia]

Un material completamente reflectante, tendrá un coeficiente de transmisión de 0, mientras que el coeficiente de transmisión de una abertura será de 1.0. La Figura 3.8 muestra la variación del coeficiente de transmisión para ondas con un ángulo de incidencia de 0° estimados a partir de la ecuación 2.21. También se observa que para frecuencias mayores a 500[KHz], la placa se comporta como un material 100% reflectante (ver APÉNDICE D).

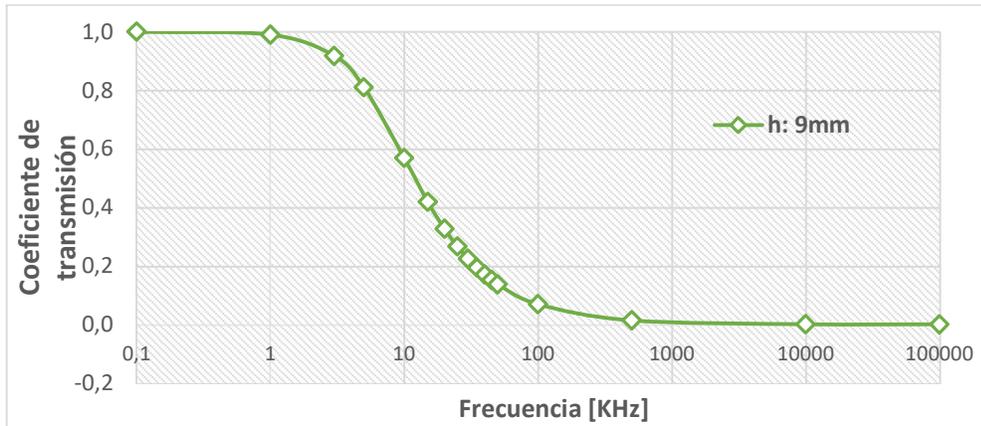


Figura 3.8 Coeficiente de transmisión para ondas de incidencia normal vs frecuencia acústica [Propia]

La Figura 3.9 muestra la variación del coeficiente de transmisión de una onda de 30[KHz] llegando a la placa en diferentes ángulos de incidencia. Se observa que para ángulos mayores a 70°, el planchaje permitirá transmitir la señal en un 100%.

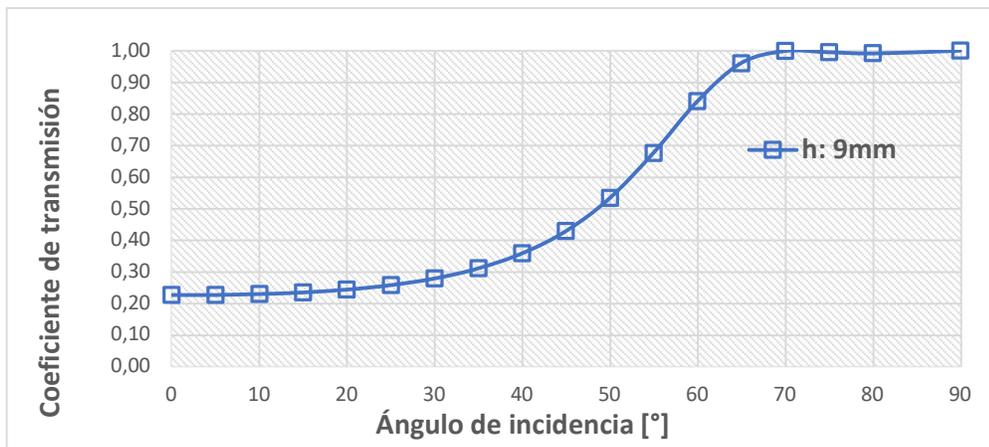


Figura 3.9 Coeficiente de transmisión de una onda acústica viajando a 30 [KHz] a diferentes ángulos de incidencia [Propia]

La frecuencia es inversamente proporcional al espesor del domo, por lo que si estimamos el producto frecuencia acústica-espesor pequeño, las pérdidas por reflexión también serán pequeñas transmitiéndose en su mayoría a través de la pared del domo. Esta idea es clave para analizar las placas paralelas a los transductores. Sin embargo, en el mejor de los casos es recomendable tener una pared completamente reflectante en las zonas de ruido.

Aplicando las dimensiones de la geometría del domo instalado en el BAE Orión, tenemos un espesor de 9 [mm] y una frecuencia de operación de 30 [KHz], lo cual nos da un producto de 10.61[KHZ-in]. Ingresamos con este valor en las curvas dadas en Figura 3.10, colocándonos en la zona de pérdida por transmisión mayor a 10 [dB] medido a incidencia normal, 0°.

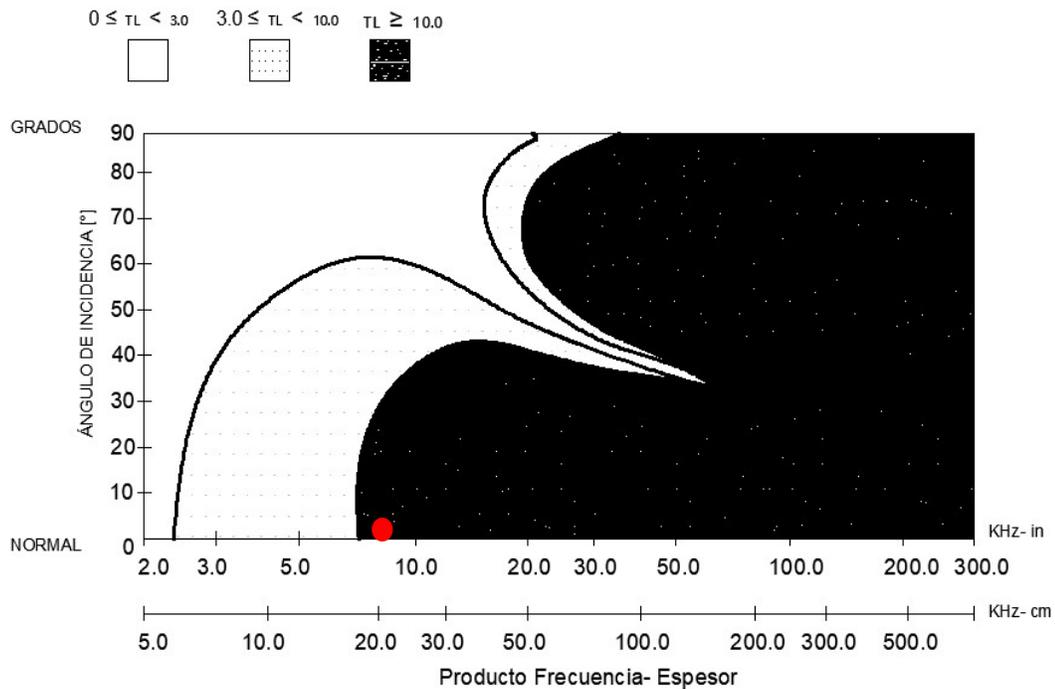


Figura 3.10 Variación de pérdida por transmisión de una placa plana de acero en función del ángulo de incidencia y el producto f*h [KHz.in], [6]

La figura 3.11 analiza las pérdidas generadas por ondas viajando en el agua a una frecuencia de 30 [KHz]. La figura 3.10 analiza las pérdidas generadas por ondas viajando a una frecuencia de 30 [KHz]. Según el ángulo de incidencia se observa que la mayor pérdida sucede cuando la señal llega a la placa con un ángulo de 0°, representando un 88% de pérdida. También, muestra que para ángulos mayores a 70° el planchaje del domo de sonar EM302 se vuelve totalmente transparente en el agua, es decir que no presenta pérdidas por transmisión acústica debido a la inserción de la placa. (ver apéndice D).

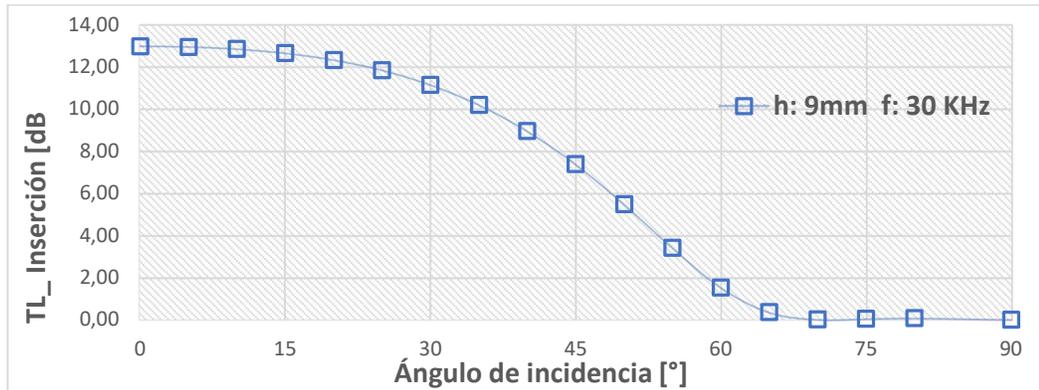


Figura 3.11 Pérdidas por inserción vs ángulo de incidencia, frecuencia 30[KHz], [Propia]

Así mismo la Figura 3.12, muestra que ondas con frecuencias mayores a 40[KHz] llegando a la placa con un ángulo de incidencia de 0° respecto del eje de referencia, serán reflejadas en un 100%. Mientras que, la Figura 3.13 muestra la inversa de la reflexión por lo que se confirma que para frecuencias bajas la transmisión de la señal en el planchaje del domo será completa.

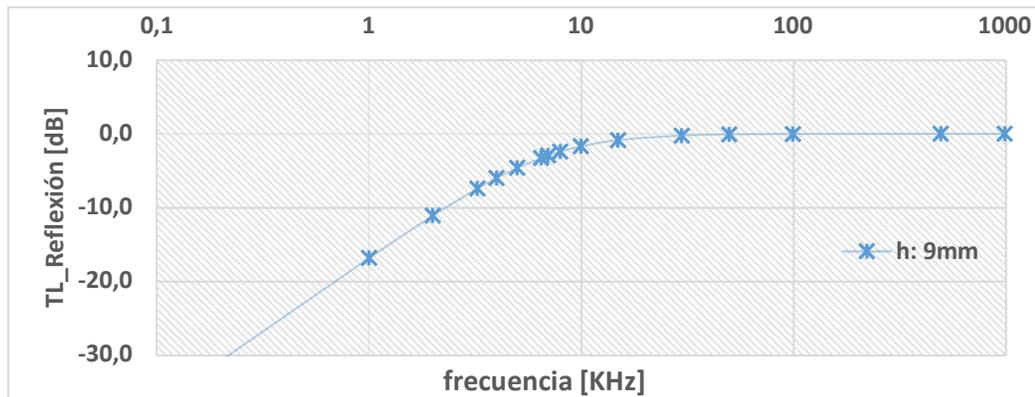


Figura 3.12 Pérdidas por reflexión del sonido para ondas de incidencia normal vs frecuencia [Propia]

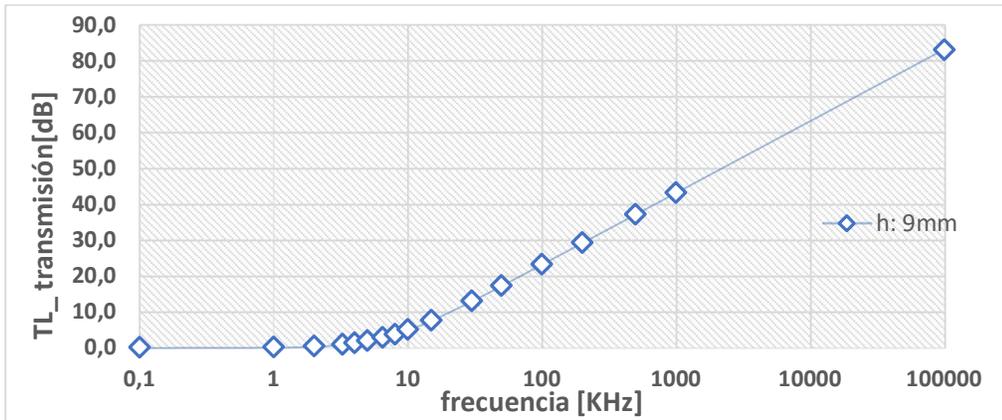


Figura 3.13 Pérdidas de transmisión acústica para ondas de incidencia normal vs frecuencia [Propia]

Finalmente, la Figura 3.14 muestra las pérdidas por transmisión a incidencia aleatoria a diferentes frecuencias, observando que para una frecuencia de 30[KHz] se tendrá una pérdida de 8.2 [dB] dando como resultado un 75% de pérdidas. La Tabla 3.4 muestra las pérdidas por transmisión totales obtenida por influencia del domo, evaluadas a una frecuencia de 30[KHz].

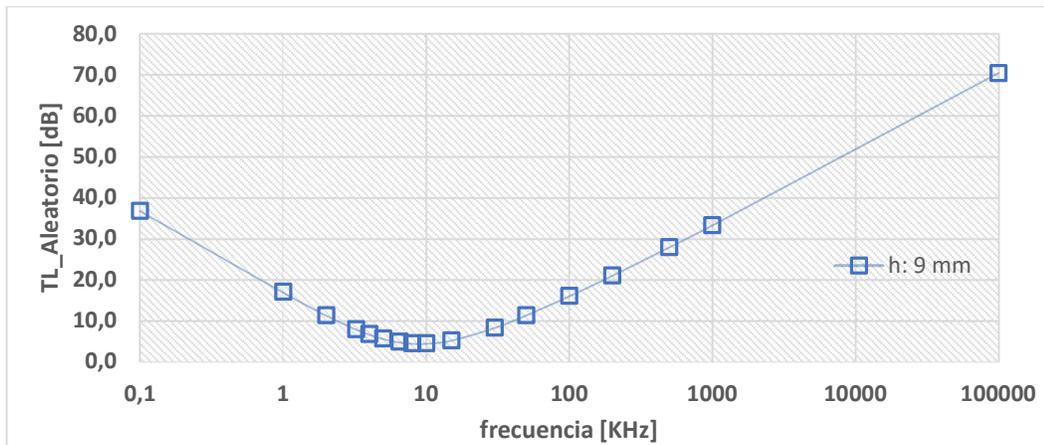


Figura 3.14 Pérdidas por Transmisión a incidencia aleatoria vs frecuencia [Propia]

Tabla 3.4 Pérdidas por Transmisión a incidencia aleatoria vs frecuencia [Propia]

Reflectividad	0.225 [dB]
Inserción	12.98 [dB]
Transmisión aleatoria	8,2 [dB]
Inducida por la vibración	-301.71 [dB]

Para validar la formulación teórica representada por las ecuaciones 2.21, 2.24 y 2.25, se evalúa dichas ecuaciones considerando las características mostradas en la Tabla 3.5 referente a una placa plana de acero simplemente soportada utilizada en el análisis de las propiedades acústicas de los materiales del domo de sonar. Este trabajo [24][24][25] [24], se analiza las pérdidas de inserción y reflexión de paneles de diferentes tipos de materiales de forma experimental, en un rango de 2-10 [KHz]. Para esto [24] diseñaron un sistema sumergido en agua conformado principalmente por: una fuente (emisor), una placa plana y un hidrófono (receptor). La Figura 3.15 muestra las pérdidas por inserción obtenidas evaluando el logaritmo en base 10 de la razón entre la presión percibida por el hidrófono y la presión emitida por la fuente. Así mismo la Figura 3.16 muestra las pérdidas por reflexión evaluando la razón entre la presión reflejada es decir la diferencia entre la presión emitida por la fuente y la presión percibida por el hidrófono, y la presión incidente. El formato logarítmico es necesario para obtener resultados en decibeles.

Finalmente se concluye que los resultados experimentales, siguen la misma tendencia de la curva evaluada con la formulación teórica implementada en este estudio, con una similitud del 95%.

Tabla 3.5 Características principales de la placa utilizada en la referencia [Propia]

Descripción	Unidad	Cantidad
Densidad de masa _ acero	ρ_{steel} [kgm/m ³]	7,85E+03
Espesor de la placa	h [m]	9,20E-04
Densidad de masa _ fluido	ρ_{water} [kgm/m ³]	1,00E+03

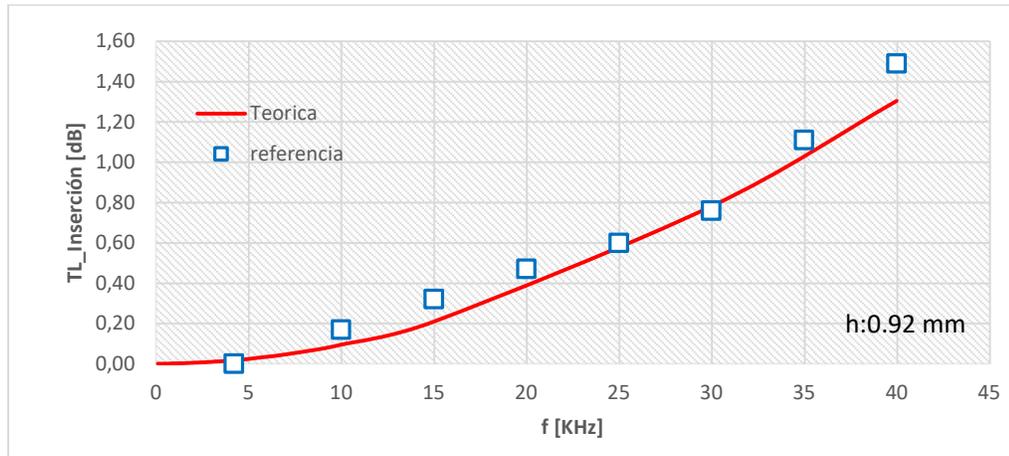


Figura 3.15 Curva de pérdidas por inserción de la placa vs frecuencia [24]

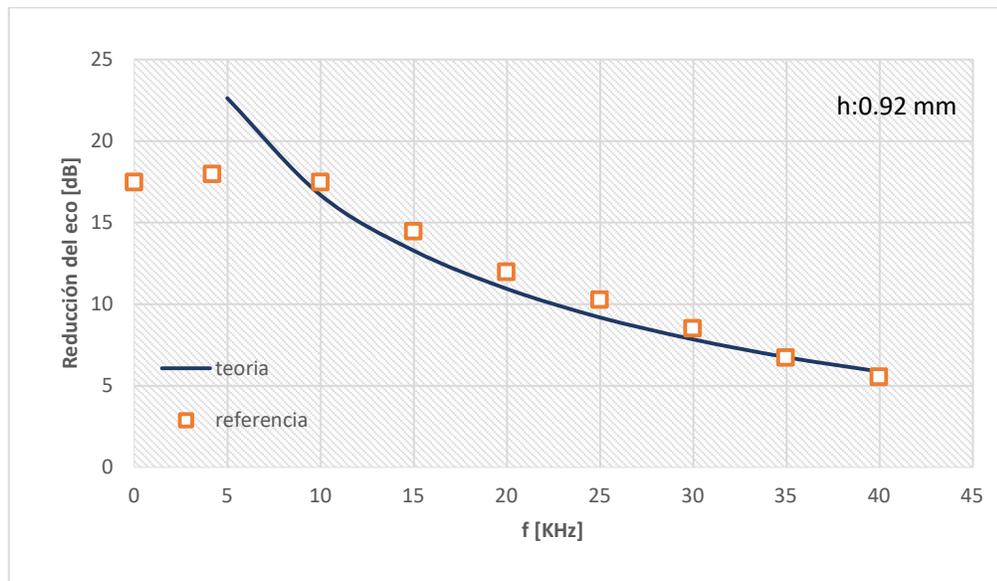


Figura 3.16 Curva de pérdidas por reducción del eco, vs frecuencia [24]

3.2 Verificación de los rangos permitidos en el domo del BAE Orión

Para minimizar el ruido acústico generado por la turbulencia a lo largo del borde del domo, el fabricante recomienda que el planchaje de proa, popa y costados del domo estén situados a una distancia mínima de 30[cm] con respecto a los transductores. El domo instalado en el BAE Orión cuenta con transductores protegidos por una caja metálica que cumple con este requerimiento, por tal razón

se tomó como rango de estudio entre $\pm 33\%$ a $\pm 10\%$ de las medidas actuales del domo.

El rango de espesores fue definido en base a la cantidad de energía reflejada por las placas que rodean a los transductores. En este caso se requiere un planchaje con espesor mínimo de 8[mm] y máximo de 13[mm] para que frecuencias mayores a 30[KHz] puedan ser reflejadas de un 75%. a 100%.

Para verificar la influencia de las características vibro-acústicas, con respecto a las dimensiones del domo, se evaluó en un rango como se observa en la siguiente Tabla 3.6, aplicando la simplificación de la geometría del domo como una placa simplemente soportada.

Tabla 3.6 Dimensiones de los rangos de domos evaluados [Propia]

	Domo_min	Domo_actual	Domo_max
t[mm]	6.0	9.0	13.0
a[m]	4.47	5.59	7.43
b[m]	3.51	3.90	4.30

Como se observa en la Figura 3.17, se obtiene como resultado que el domo instalado actualmente en el BAE Orión es el que tiene el menor valor de respuesta para las diferentes paredes del domo, para una velocidad de 5 nudos. Lo cual es bueno ya que, si pasa de un valor negativo a positivo de la respuesta, este generara ruido al interior del domo.

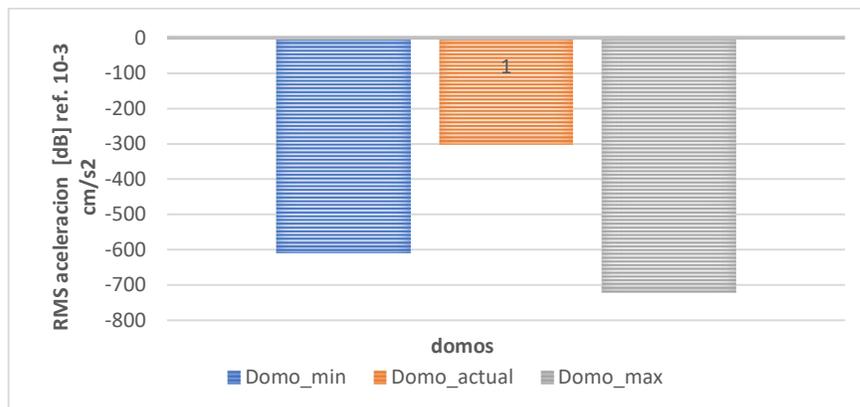


Figura 3.17 RMS aceleración de las paredes de los domos vs domos [Propia]

De igual manera, en la Figura 3.18 se muestra las pérdidas generadas por transparencia acústica, para los diferentes domos. Obteniendo como resultado que el domo con menor dimensiones genera mínima pérdidas por transmisión, y este aumenta en relación con las dimensiones.

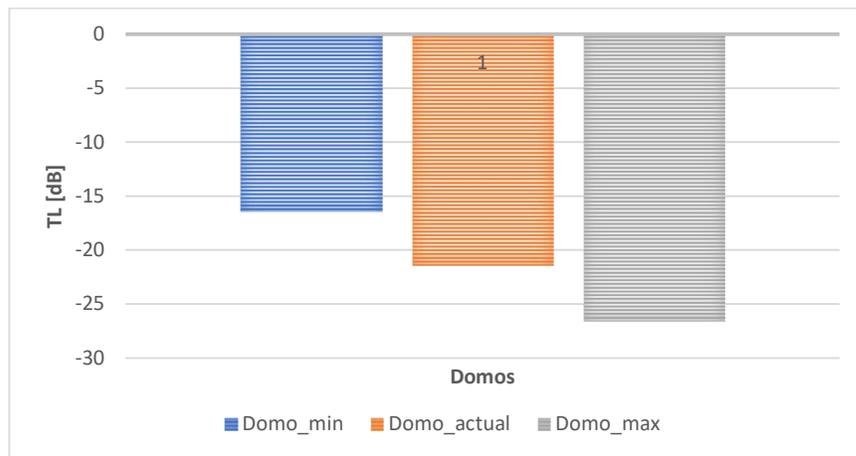


Figura 3.18 Pérdidas de transparencia acústica en las paredes de los domos vs domos [Propia]

3.3 Variación entre los resultados obtenidos y las predicciones del fabricante

La Tabla 3.7 muestra el nivel de detección del sonar (ecuación 2.1) evaluado en base a las formulaciones dadas por el fabricante, ecuación 2.2- 2.5. Se reconoce que las predicciones del fabricante no contemplan las pérdidas por transmisión acústicas generadas por la geometría del domo, por lo que se obtiene como resultado un nivel de señal recibido por el sistema sonar de 199.84 [dB], mientras que al incluir las pérdidas por transmisión evaluadas en este estudio da como resultado 178.47 [dB]. Esto representa un 11% de la pérdida de la señal resultante que recibe el sonar, debido a la influencia del domo. Las predicciones del fabricante recomiendan que el rango permisible del nivel de señal recibida debe de ser mayor a 10 [dB], manteniéndose los resultados por encima de este valor.

Tabla 3.7 Comparación entre los resultados obtenidos y las predicciones del fabricante, 11% de pérdidas [Propia]

Nivel de señal (EL)		
EM-302	Con pérdidas	Fabricante
Frecuencia [kHz]	30	30
PL[W/m ²]	214	214
DI[dB]	46,2	46,2
SL[dB]	240,30	240,30
TL[dB]	90,33	68,95
BTS[dB]	28,49	28,49
EL[dB]	178,47	199,84

La Figura 3.19 muestra gráficamente la diferencia entre las pérdidas por transmisión acústica evaluadas anteriormente con las predichas por el fabricante. Se observa que la influencia de las pérdidas por transmisión acústica se incrementa en un 31% con respecto a las predicciones del fabricante, debido a que este no considera las pérdidas generadas por la geometría del domo.

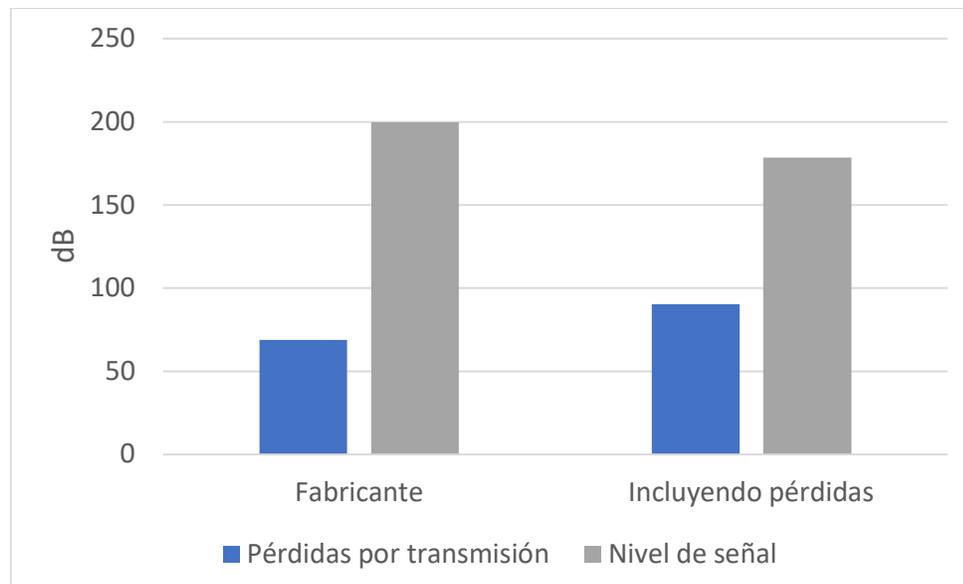


Figura 3.19 Comparación de las pérdidas de transmisión por influencia del domo con las predicciones del fabricante [Propia]

3.4 Evaluación del ambiente acústico al interior del domo instalado en el BAE Orión

Considerando los resultados analizados en secciones anteriores sobre las pérdidas por transmisión obtenidas en base a factores vibro-acústicos, se definen 7 condiciones, que nos permitirán evaluar la influencia de la geometría del domo en el rendimiento del sonar y de esta manera conocer mediante una matriz de decisiones (Ver APÉNDICE E), la eficiencia del domo actual instalado en el BAE Orión, las condiciones son:

1) Ubicación longitudinal desde el C.G del domo hasta proa [5]

El fabricante recomienda instalar el domo de sonar a una distancia máxima de $1/3L$ [m] medido desde proa, para evitar fluctuaciones de presión debido al flujo turbulento y burbujas en la superficie de la cara del transductor que se encuentra en contacto con el agua. El BAE Orión cuenta con 70.21 [m] de eslora, por lo que $1/3L$ corresponde a 24.4 [m]. El domo de sonar se encuentra instalado a 19.09[m] respecto de proa, valor que se encuentra dentro del rango permitido.

2) Distancia del receptor con la curvatura de la pared [5]

Para minimizar el ruido acústico generado por el flujo turbulento en los costados del domo se recomienda una distancia mínima de 30[cm] entre el transductor de recepción y el borde curvo del planchaje de las paredes del domo. En este caso existe una distancia de 36[cm] entre el receptor y la caja que lo protege y 62[cm] entre el receptor y la pared inclinada situada en popa.

3) Frecuencia crítico [6]

Como todo cuerpo, los domos son estructuras elásticas capaces de vibrar cuando una onda acústica a determinada frecuencia coincide con su frecuencia natural (onda flexural), alcanzando el fenómeno denominado resonancia acústica. Para evitar que el ruido propio del domo interfiera en la señal del sonar se recomienda que la frecuencia en estudio este por debajo de la frecuencia crítica. En este caso el modo básico de vibración por flexión del planchaje del domo se activa a una frecuencia crítica de 27 [KHz], menor a la frecuencia de funcionamiento del sonar, 30[KHz].

4) Coeficiente de transmisión [6]

Coeficiente de transmisión o transparencia acústica se refiere la relación entre la presión incidente y la presión transmitida a través de una placa según el tipo de material del domo. El coeficiente es aceptable cuando la razón es mayor al 75%. La presión transmitida se vuelve igual a la presión incidente cuando, $kh \frac{\rho_s}{\rho} \ll 1.0$. En este caso evaluando la condición con las características del domo del BAE Orión resulta un valor de $0.00018 \ll 1.0$.

5) Espesor de pared [6]

El espesor es inversamente proporcional a la frecuencia acústica, por lo que, si se trabaja con altas frecuencias y se requiere un coeficiente de transmisión mayor, el espesor de la placa debe ser menor a 2 [mm]. Por el contrario, si se requiere evitar ondas de ruido en el interior del domo, las paredes que rodean a los transductores deben tener un espesor mínimo de 8[mm] para que frecuencias mayores a 30[KHz] puedan ser reflejadas de un 75%. a 100%.

6) Respuesta por flujo inducido en la pared del domo [2]

Para determinar si la geometría del domo genera un buen ambiente acústico se debe comprobar que esta genere el menor ruido posible o que sea igual a cero, para que no interfiera en el rendimiento del sonar esto como respuesta al flujo inducido, para esto se consideró como condición de que el RMS de aceleración de la pared del domo sea ≤ 0 , teniendo como resultado que la pared del domo instalado en el BAE Orión genera -301.71 [dB] de ruido inducido satisfaciendo esta condición.

7) Respuesta por transparencia en la pared del domo [6]

Para evitar que frecuencias de ruido logren transferirse a través del planchaje del domo de sonar, se analiza la transparencia acústica del material. Esta condición debe ser máxima en dirección de la transmisión y recepción de la señal, y al mismo tiempo debe ser mínima en la dirección del ruido que intenta ingresar al domo. Como resultado de la evaluación se obtiene que las placas que conforman el domo generan pérdidas totales por transmisión de 21.4 [Db], reflejando las ondas de ruido con frecuencias mayores a 30[KHz] en un 78%.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos bajo la metodología propuesta para la evaluación del domo de sonar instalado en el BAE Orión, mediante la evaluación de las características vibro-acústicas, verificación de los rangos permitidos, comparación entre los resultados obtenidos y las predicciones de fabricante, y la evaluación del ambiente acústico en el interior del domo se concluye y recomienda lo siguiente:

4.1 Conclusiones

- Se identificó a los transductores como elemento importante del comportamiento acústico del sistema de sonar. Estas unidades son instaladas en la parte más baja de la embarcación, y al ser equipos de alta sensibilidad deben ser protegidos por una estructura denominada domo. La geometría de este domo debe ser capaz de generar un buen ambiente acústico que le permita al transductor obtener señales confiables para su operación
- Se comprendió el significado físico de cada uno de los términos acústicos y su relación con el domo. Concluyendo que los factores que más influyen son, la frecuencia de operación, el ángulo de incidencia de la onda, el material y espesor del domo de sonar y la impedancia acústica tanto del medio como de la pared del domo.
- Se logró identificar los parámetros más relevantes con respecto a la geometría del domo y operación del sonar. El nivel de sonido, la transmisión acústica y ruido inducido por el flujo fueron necesarios para evaluar la influencia del domo en las pérdidas de la señal recibida por el sonar.
- Se realizó un bosquejo del arreglo estructural del domo en base a fotografías, donde se observa el proceso de instalación. Sin embargo, se desconoce las dimensiones exactas del arreglo estructural de su interior, debido a que el buque estaba operando durante el periodo de elaboración del proyecto. Así mismo la empresa fabricante del equipo de sonar no brindó información sobre el tipo de material de la cara del transductor expuesta al agua, este requerimiento es necesario para efecto de comparación de pérdidas por transmisión acústica.

- Se identificaron algunos factores de diseño del domo como fuentes que generan ruido propio de origen hidrodinámico. Otras fuentes de ruido como maquinaria, propulsión o la misma estructura del buque también suelen generar ruido propio, que tiende a propagarse a lo largo de la embarcación al entrar en resonancia con los refuerzos, irradiándose en el agua y consecuentemente al domo de sonar. Sin embargo, no fueron considerados en este estudio, debido a que actualmente existen embarcaciones modernas construidas bajo estándares que regulan el ruido, diseño de hélices con baja cavitación, deflectores, etc.
- Para cuantificar el nivel de sonido en el interior del domo se empleó formulaciones semi-empíricas y formulaciones dadas por el fabricante del sonar. Se determinó un 11% de pérdidas por transmisión adicionales debido a la influencia de la geometría del domo. Mientras que el nivel de señal del sonar disminuye en un 31%. El fabricante asegura que para que exista la lectura de la señal por parte del transductor el nivel de sonido debe ser al menos 10 [dB]
- Para probar la veracidad de la teoría planteada en este proyecto, en el caso de transparencia acústica, se evaluó esta teoría utilizando las características de una placa plana de acero simplemente soportada utilizada en el análisis de las propiedades acústicas de los materiales del domo de sonar [24]. Este trabajo [24], analiza las pérdidas de inserción y reflexión de paneles de diferentes tipos de materiales de forma experimental. Finalmente se concluye que los resultados experimentales, siguen la misma tendencia de la curva evaluada con la formulación teórica implementada en este estudio, con una similitud del 95%.
- En base a los resultados obtenidos empleando características vibro- acústicos y las perdidas debido a la transmisión acústica del material, se logró elaborar un formato con 7 condiciones principales que nos permitieron evaluar la geometría del domo de forma preliminar, obtenido que el domo actual instalado en el buque oceanográfico BAE Orión perteneciente a la armada del Ecuador cumple con 6 de las condiciones planteadas en este estudio. Además, se determinó que la geometría del domo se puede modificar en un

rango de $\pm 30\%$ de la longitud total y un $\pm 10\%$ del ancho total, tomando como referencia las medidas del domo actual.

4.2 Recomendaciones

- Aunque este estudio analiza la geometría del domo y cuantifica el porcentaje de transmisión acústica de la energía de espectros de ruido y ondas puras llegando a la pared del domo en diferentes ángulos de incidencia, nos preguntamos ¿qué sucede con el porcentaje transmitido al interior del domo?, ¿qué porcentaje de energía incidente se disipa debido al material de las paredes del domo? En el presente estudio no se pudo responder a estas interrogantes, debido a que se requiere de un conocimiento superior de la física acústica.
- Realizar pruebas experimentales con modelos de domos con geometría arbitraria, fabricados en diferentes tipos de material, a fin de cuantificar las fluctuaciones de presión en los costados del domo. Esta densidad espectral es necesaria para la evaluación de la respuesta de la pared del domo a la radiación de ruido, debido a la excitación acústica.
- Realizar un análisis de las incertidumbres de cada variable y parámetro físico u operacional implementado en este estudio, de tal manera que permita un control de riesgos y aporte a la credibilidad de los resultados.
- Se recomienda realizar simulaciones utilizando las técnicas de CFD, que permitan conocer el comportamiento de la geometría del domo frente a diferentes fuentes de ruido, a fin de convalidar los rangos de las dimensiones principales del domo determinadas en este estudio.
- Aunque este estudio vibro- acústico sienta las bases que muestran la veracidad de la metodología empleada para evaluar el ambiente acústico en el interior del domo, existen algunos aspectos por investigar para la mejora de la metodología propuesta. Por ejemplo, tomar en cuenta una configuración estructural en el interior del domo podría afectar al coeficiente de transmisión y consecuentemente a la señal en el caso de domos cuya geometría cubra completamente al transductor.

- A las futuras generaciones que deseen realizar proyectos basados en estudios vibro- acústicos, se recomienda utilizar esta metodología como guía básica, ya que será de gran ayuda para poder tomar decisiones en fase de diseño que permitirán mejorar la geometría en estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Musha and T. Kikuchi, "Numerical calculation for determining sonar self noise sources due to structural vibration," vol. 58, pp. 3–13, 1999.
- [2] V. B. Rao, "On the Flow-Induced Structural Noise of a Ship's Sonar Dome," vol. 24, no. 4, pp. 321–331, 1987.
- [3] L. Maxit, "Hydrodynamic noise prediction inside a Sonar dome : injected power estimation from the wavevector - frequency spectrum of turbulent wall pressure," no. March 2016, 2005.
- [4] R. Paredes, "Análisis hidrodinámico de BAE Orión usando CFD Resumen," 2018.
- [5] KONGSBERG MARITIME, "Specification product em_302." 2014.
- [6] H. Loeser, "Principles of Sonar Installation," 1982.
- [7] D. N. Manik, *Vibro-Acoustics Fundamentals and Applications*. 2017.
- [8] C. A. Schuler, *Electronics: Principles and Applications*, McGraw-Hil. New York, USA, 2002.
- [9] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*. 2000.
- [10] P. K. Chakravorty and V. Bhujanga, "Some Aspects in the Design of Sonar bomes," vol. 32, no. 1, pp. 47–54, 1982.
- [11] M. Strasberg, "Response of Plates and Membranes to Pressure Fluctuations of a Turbulent Boundary Layer," *J. Acoust. Soc. Amer*, vol. 30, p. 680, 1958.
- [12] M. K. Bull, "Wall Pressure Fluctuations in Boundary Layer Flow and Response of Simple Structures to Random Pressure Field," 1963.
- [13] P. H. White, "Transduction of Boundary-Layer Noise by a Rectangular Pane," *J. Acoust. Soc. Amer*, 1966.
- [14] G. M. Corcos, "The Structure of the Turbulent Pressure Field in Boundary-Layer Flows," *J. Fluid Mech*, vol. 18, pp. 353–378, 1964.
- [15] W. Strawderman and R. Brand, "Turbulent-Flow-Excited Vibration of a Simply Supported, Rectangular Flat Plate," *J. Acoust. Soc. Ame*, vol. 45, pp. 177–192, 1968.
- [16] M. Harrison, "Pressure Fluctuations on Wall Adjacent to a Turbulent Boundary Layer," 1958.

- [17] H. Estrada, "LAS PERDIDAS DE TRANSMISION EN LA PREDICCION ACUSTICA SUBMARINA," 1995.
- [18] C. J. B. Sabando, "SUPERVISIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y MODERNIZACIÓN DEL BUQUE DE INVESTIGACIÓN 'ORIÓN' DE LA ARMADA DEL ECUADOR," Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2008.
- [19] C. Degel *et al.*, "3D Sonar System based on Mills Cross Antenna Configuration," 2014 *Océanos - St. John's*, 2014, doi: 10.1109 / OCEANS19395.2014.
- [20] E. Hammerstad, "Sound Levels from Kongsberg Multibeam," 2005.
- [21] E. Hammerstad, "Backscattering and Seabed Image Reflectivity," 2000.
- [22] R. S. Brand and W. Strawderman, "Turbulent-Flow-Excited Vibration of a Simply Supported, Rectangular Flat Plate," no. March, pp. 177–192, 1968.
- [23] E. J. Skudyrzk and G. P. Haddle, "Noise Production in Turbulent Boundary Layer by Smooth and Rough Surfaces," *J. Acoustical Soc. Am.*, vol. 32, pp. 19–34, 1960.
- [24] J. Yves, J. P. . Szabo, and Q. Liu, "Acoustic Properties of sonar dome materials," 1995.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Diagrama del sistema Multihaz EM-302

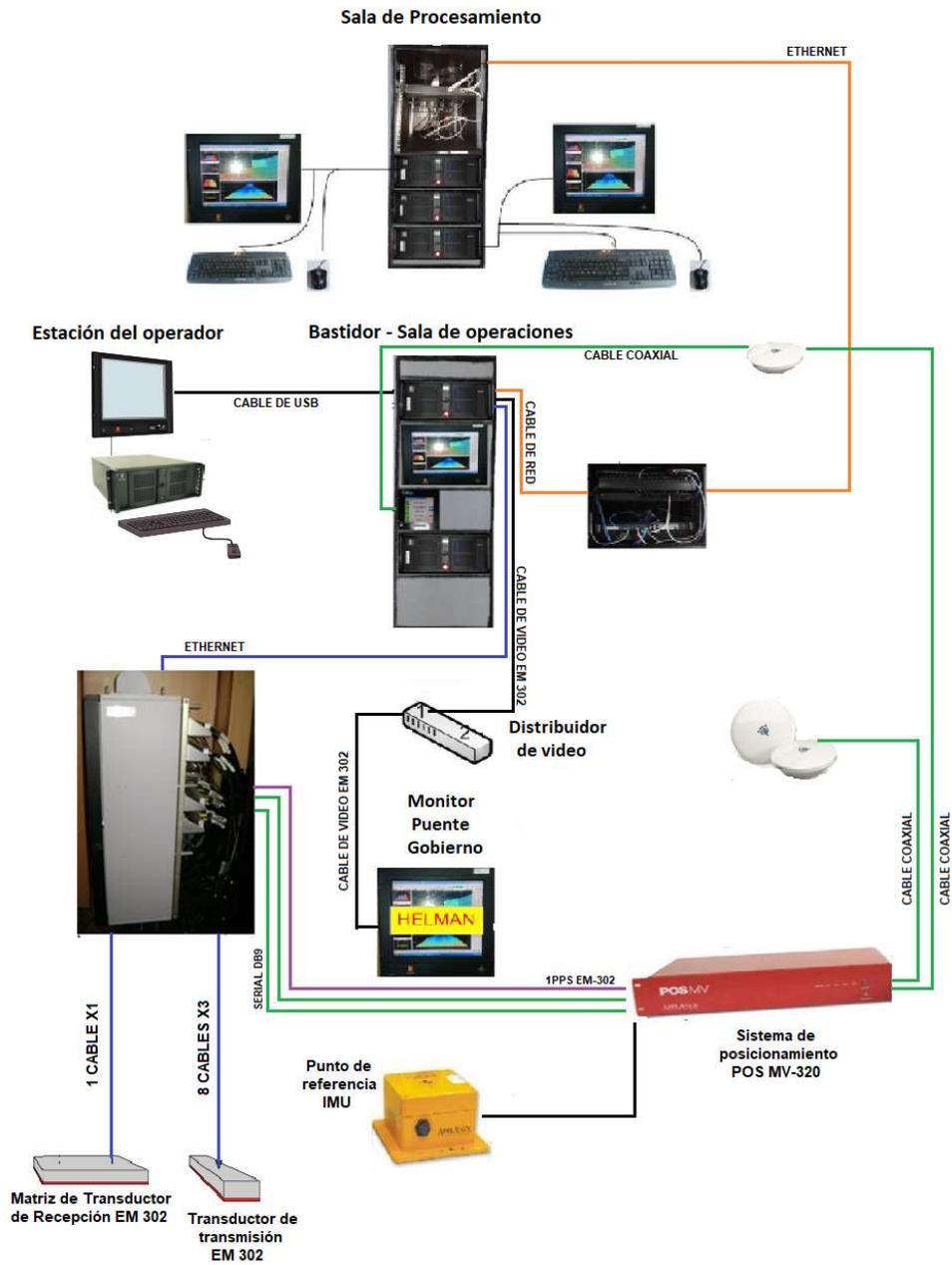


Figura A.1 Diagrama en bloque del sistema multihaz EM-302 instalado en el BAE Orión

APÉNDICE B

Dimensiones de los módulos de transmisión y recepción del EM-302

TX1 module, outline dimensions

Figure 72 Outline dimensions – TX1 module

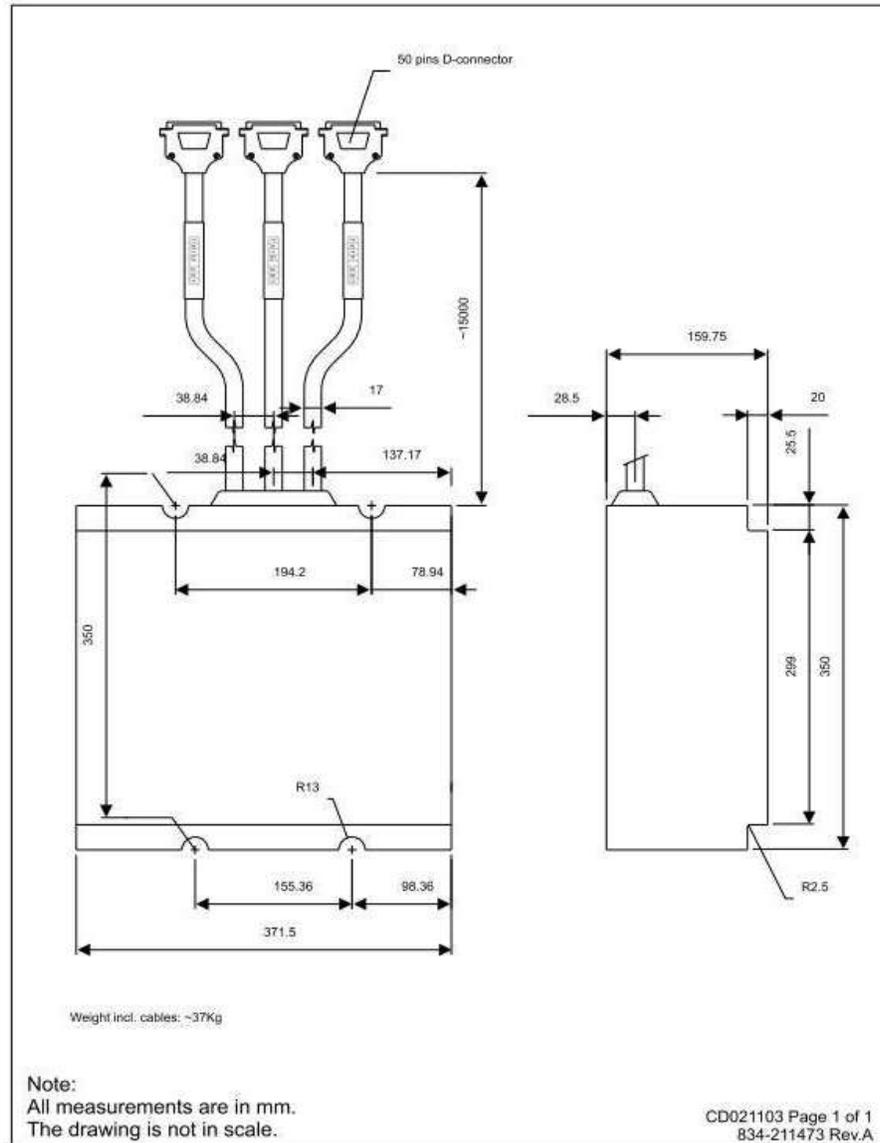


Figura B.1 Dimensiones generales del módulo de transmisión TX [5]

RX module, outline dimensions,

Figure 59 Outline dimensions RX module

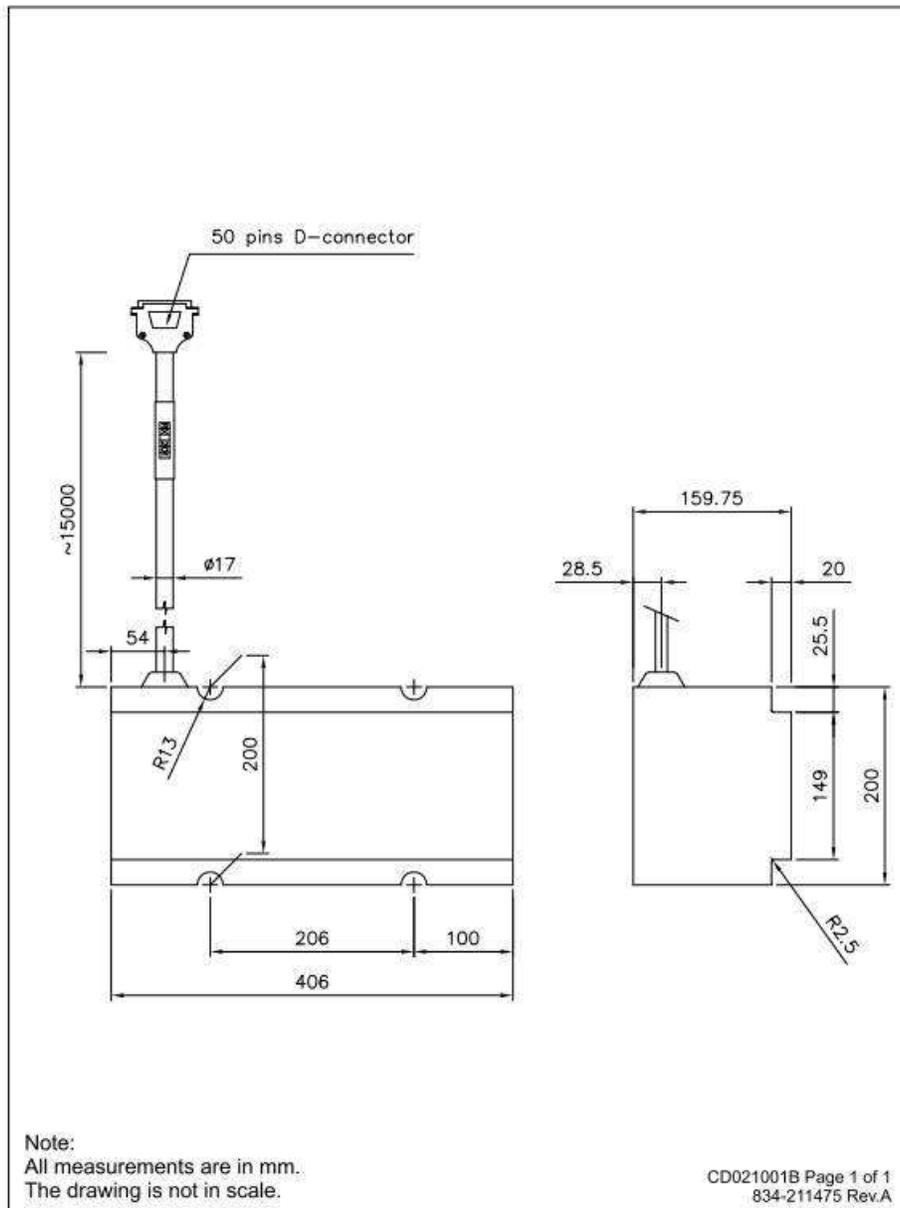


Figura B.2 Dimensiones generales del módulo de recepción RX [5]

APÉNDICE C

Plano de líneas de formas de BAE Orión

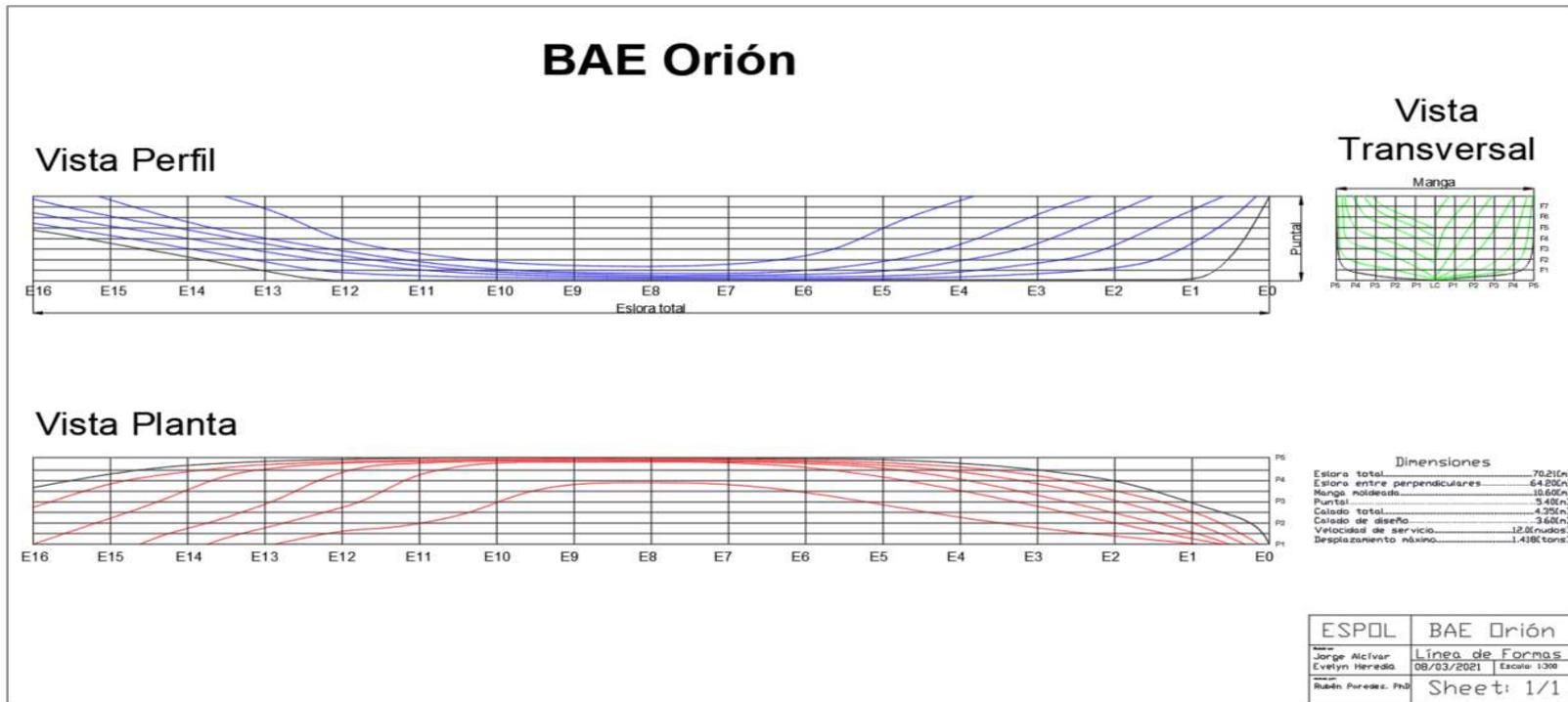


Figura C.1 Líneas de Forma del BAE Orión antes de la instalación del domo de sonar [Propio]

APÉNDICE D

Estimación de la RMS de aceleración de la pared del domo instalado en el BAE Orión

Siguiendo la figura 2.18, se inicia estimando:

- I. Espesor de la capa limite, δ^*

$$\delta^* = \frac{0.048x}{(Uo*x/\nu)^{1/5}} \quad (D.1)$$

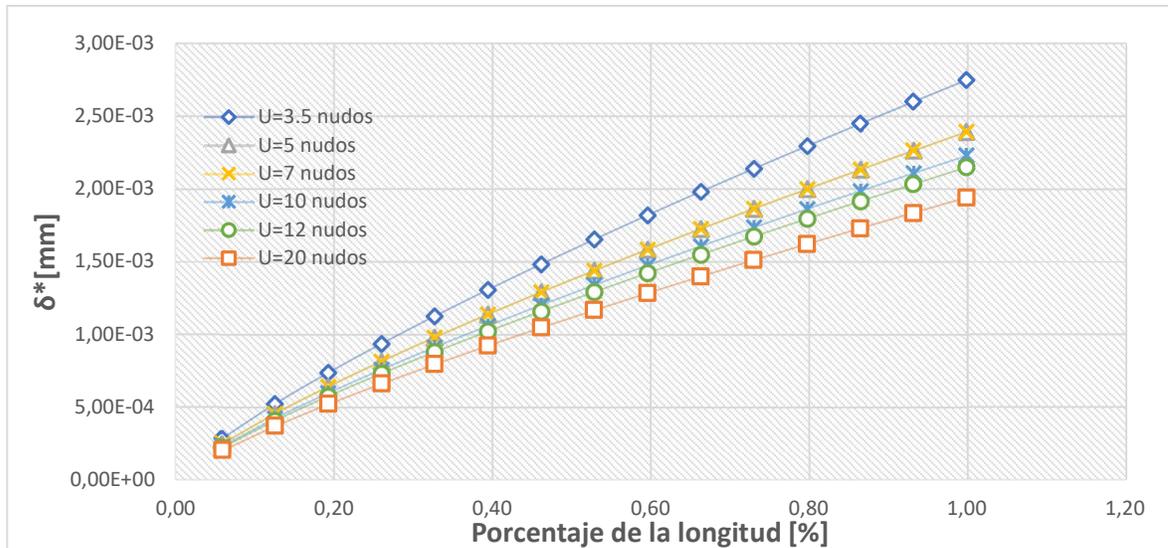


Figura D.1 Espesor de la capa limite vs porcentaje de la longitud del domo [Propia]

Tabla D.1 Cálculos para la estimación del espesor de la capa limite [Propia]

Porcentaje de la longitud		velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
0,06	0,06	2,85E-04	2,65E-04	2,48E-04	2,31E-04	2,23E-04	2,01E-04
0,13	0,13	5,23E-04	4,87E-04	4,55E-04	4,24E-04	4,08E-04	3,69E-04
0,19	0,19	7,37E-04	6,86E-04	6,41E-04	5,97E-04	5,76E-04	5,20E-04
0,26	0,26	9,36E-04	8,71E-04	8,15E-04	7,59E-04	7,31E-04	6,60E-04
0,33	0,33	1,12E-03	1,05E-03	9,79E-04	9,12E-04	8,79E-04	7,94E-04
0,39	0,39	1,31E-03	1,22E-03	1,14E-03	1,06E-03	1,02E-03	9,22E-04
0,46	0,46	1,48E-03	1,38E-03	1,29E-03	1,20E-03	1,16E-03	1,05E-03
0,53	0,53	1,65E-03	1,54E-03	1,44E-03	1,34E-03	1,29E-03	1,17E-03

Porcentaje de la longitud		velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
0,60	0,60	1,82E-03	1,69E-03	1,58E-03	1,47E-03	1,42E-03	1,28E-03
0,66	0,66	1,98E-03	1,84E-03	1,72E-03	1,61E-03	1,55E-03	1,40E-03
0,73	0,73	2,14E-03	1,99E-03	1,86E-03	1,73E-03	1,67E-03	1,51E-03
0,80	0,80	2,30E-03	2,14E-03	2,00E-03	1,86E-03	1,79E-03	1,62E-03
0,86	0,86	2,45E-03	2,28E-03	2,13E-03	1,98E-03	1,91E-03	1,73E-03
0,93	0,93	2,60E-03	2,42E-03	2,26E-03	2,11E-03	2,03E-03	1,83E-03
1,00	1,00	2,75E-03	2,56E-03	2,39E-03	2,23E-03	2,15E-03	1,94E-03

II. Estimación de la respuesta, RMS

Tabla D.2 Dimensiones principales del domo instalado en el BAE Orión [Propia]

Dimensiones	
a[m]	5,95
b[m]	3,9
t[m]	0,009
E[kg/m ²]	2,11E+10
D	1,41E+03
U[m/s]	1,03E+01
Uc[m/s]	6,682
nu[m ² /s]	1,11E-06
δ*[m]	1,94E-03
α	1,00
ρagua[kg/m ³]	1000,00
ρacero[kg/m ³]	7800,00
A	1,58E+01
r	0,05
μ	70,20
γ[kg/m ² s]	76440

Empleando la formulación 2.16

$$S_{aa}(x, y, \omega) = \omega^4 \Phi(\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{q\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) G_{ns} W_{mnqs}}{T_{mn} \cdot T_{qs} \cdot P_s \cdot P_n \cdot R_m \cdot R_q} \right] \quad (D.2)$$

A continuación, se detallan las variables empleadas en la formulación

$$T_{mn} = \left[(\omega_{mn}^2 - \omega^2) + \left(\frac{r\omega}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.3)$$

$$P_n = \left(\frac{0.7\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (D.4)$$

$$R_m = \left\{ \left[\left(\frac{0.115\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{a} - \frac{\omega}{U_c} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{0.115\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{a} + \frac{\omega}{U_c} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (D.5)$$

$$G_{ns} = 0.35 \frac{\omega b}{U_c} \delta_{ns} \left[2 \left(\frac{0.7\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{s\pi}{b} \right)^2 \right] + \frac{ns\eta^2}{b^2} (1 - \delta_{ns}) [(-1)^n (-1)^s - 1] + \frac{ns\pi^2}{b^2} \left\{ 2 - [(-1)^n + (-1)^s] e^{-0.7 \left(\frac{\omega b}{U_c} \right)} \right\} \quad (D.6)$$

$$W_{mnqs} = 1.0066 \frac{\omega a}{U_c} \delta_{mq} R_m \cos(v_m - 0.463\pi) \cos(\lambda_{mn} - \lambda_{qs}) + \frac{2mn\pi^2}{a^2} \cos(v_m - v_q) \cos(\lambda_{mn} - \lambda_{qs}) + \frac{mq}{a^2} (1 - \delta_{mq}) \frac{[(-1)^m (-1)^q - 1]}{\left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \left(\frac{q\pi}{a} \right)^2 \right]} R_m \cos(v_q + \lambda_{mn} - \lambda_{qs}) - R_q \cos(v_m + \lambda_{qs} - \lambda_{mn}) - \frac{mq}{a^2} e^{-0.115 \left(\frac{\omega a}{U_c} \right)} \left[(-1)^m \cos \left(\frac{\omega a}{U_c} + v_q + v_m + \lambda_{mn} - \lambda_{qs} \right) + (-1)^q \cos \left(\frac{\omega a}{U_c} + v_q + v_m - \lambda_{mn} + \lambda_{qs} \right) \right] \quad (D.7)$$

$$v_m = \tan^{-1} \left[\frac{0.23 \left(\frac{\omega}{U_c} \right)^2}{\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 - 0.987 \left(\frac{\omega}{U_c} \right)^2} \right] \quad (D.8)$$

$$\lambda_{qs} = \tan^{-1} \left[\frac{\gamma\omega/\mu}{\omega_{mn}^2 - \omega^2} \right] \quad (D.9)$$

Tabla D.3 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo [Propia]

f[KHz]	ω [rad/s]	m	n	q	s	x	y	wmn	wqs	Tmn	Tqs	Pn	Ps	Rm	Rq
3000	18849,6	1	1	1	1	0	0	2,61E+04	2,61E+04	1,81E+04	1,81E+04	3,90E+06	3,90E+06	8,06E+06	8,06E+06
5500	34557,5	1	3	1	3	0,07	0,07	1,72E+05	8,89E+04	1,69E+05	8,19E+04	1,31E+07	1,31E+07	2,71E+07	2,71E+07
8000	50265,5	1	5	1	5	0,13	0,13	4,64E+05	2,14E+05	4,62E+05	2,08E+05	2,77E+07	2,77E+07	5,73E+07	5,73E+07
10500	65973,4	1	7	1	7	0,20	0,20	9,03E+05	4,03E+05	9,00E+05	3,97E+05	4,78E+07	4,78E+07	9,88E+07	9,88E+07
13000	81681,4	3	1	3	1	0,27	0,27	8,89E+04	1,72E+05	3,50E+04	1,52E+05	7,32E+07	7,32E+07	1,51E+08	1,51E+08
15500	97389,4	3	3	3	3	0,33	0,33	2,35E+05	2,35E+05	2,14E+05	2,14E+05	1,04E+08	1,04E+08	2,15E+08	2,15E+08
18000	113097,3	3	5	3	5	0,40	0,40	5,27E+05	3,61E+05	5,15E+05	3,42E+05	1,40E+08	1,40E+08	2,90E+08	2,90E+08
20500	128805,3	3	7	3	7	0,47	0,47	9,66E+05	5,49E+05	9,57E+05	5,34E+05	1,82E+08	1,82E+08	3,76E+08	3,76E+08
23000	144513,3	5	1	5	1	0,53	0,53	2,14E+05	4,64E+05	1,58E+05	4,41E+05	2,29E+08	2,29E+08	4,74E+08	4,74E+08
25500	160221,2	5	3	5	3	0,60	0,60	3,61E+05	5,27E+05	3,23E+05	5,02E+05	2,82E+08	2,82E+08	5,83E+08	5,83E+08
28000	175929,2	5	5	5	5	0,67	0,67	6,53E+05	6,53E+05	6,29E+05	6,29E+05	3,40E+08	3,40E+08	7,02E+08	7,02E+08
30500	191637,2	5	7	5	7	0,73	0,73	1,09E+06	8,41E+05	1,07E+06	8,19E+05	4,03E+08	4,03E+08	8,33E+08	8,33E+08
33000	207345,1	7	1	7	1	0,80	0,80	4,03E+05	9,03E+05	3,45E+05	8,79E+05	4,72E+08	4,72E+08	9,76E+08	9,76E+08
35500	223053,1	7	3	7	3	0,87	0,87	5,49E+05	9,66E+05	5,01E+05	9,39E+05	5,46E+08	5,46E+08	1,13E+09	1,13E+09
38000	238761,0	7	5	7	5	0,93	0,93	8,41E+05	1,09E+06	8,06E+05	1,06E+06	6,26E+08	6,26E+08	1,29E+09	1,29E+09
40500	254469,0	7	7	7	7	1,00	1,00	1,28E+06	1,28E+06	1,25E+06	1,25E+06	7,11E+08	7,11E+08	1,47E+09	1,47E+09

Tabla D.4 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo [Propia]

λ_{mn}	λ_{qs}	ν_m	ν_q	ξ	η	Gns			Wmnqs			φ		Saa	30 kHz
1,5080	1,5080	1,7997	1,7997	0,00	0	2,01E+11	0	2,01E+11	1,28E+11	0	1,28E+11	2,24E-05	3,56E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,5695	1,5652	1,7997	1,7997	0,40	0,26	1,24E+12	0	11,680	7,89E+11	0	7,89E+11	3,64E-06	6,52E+00	3,19E-11	2,48E-06
1,5705	1,5695	1,7997	1,7997	0,79	0,52	3,81E+12	0	32,444	2,43E+12	0	2,43E+12	1,18E-06	9,48E+00	2,36E-11	1,83E-06
1,5707	1,5703	1,7997	1,7997	1,19	0,78	8,60E+12	0	63,591	5,49E+12	0	5,49E+12	5,24E-07	1,24E+01	1,06E-11	8,21E-07
1,4985	1,5669	1,7997	1,7997	1,59	1,04	1,63E+13	0	1,297	1,04E+13	0	1,04E+13	2,76E-07	1,54E+01	3,76E-12	2,92E-07
1,5685	1,5685	1,7997	1,7997	1,98	1,3	2,77E+13	0	11,680	1,77E+13	0	1,77E+13	1,63E-07	1,84E+01	4,93E-74	3,83E-69
1,5703	1,5697	1,7997	1,7997	2,38	1,56	4,33E+13	0	32,444	2,77E+13	0	2,77E+13	1,04E-07	2,13E+01	8,41E-44	6,53E-39
1,5706	1,5703	1,7997	1,7997	2,78	1,82	6,40E+13	0	63,591	4,09E+13	0	4,09E+13	7,04E-08	2,43E+01	8,15E-13	6,33E-08
1,5645	1,5700	1,7997	1,7997	3,17	2,08	9,04E+13	0	1,297	5,77E+13	0	5,77E+13	4,98E-08	2,73E+01	1,14E-13	8,84E-09
1,5691	1,5701	1,7997	1,7997	3,57	2,34	1,23E+14	0	11,680	7,87E+13	0	7,87E+13	3,66E-08	3,02E+01	6,25E-43	4,86E-38
1,5703	1,5703	1,7997	1,7997	3,97	2,6	1,63E+14	0	32,444	1,04E+14	0	1,04E+14	2,76E-08	3,32E+01	1,74E-13	1,35E-08
1,5706	1,5705	1,7997	1,7997	4,36	2,86	2,11E+14	0	63,591	1,35E+14	0	1,35E+14	2,14E-08	3,62E+01	2,40E-14	1,86E-09
1,5689	1,5705	1,7997	1,7997	4,76	3,12	2,67E+14	0	1,297	1,71E+14	0	1,71E+14	1,69E-08	3,91E+01	2,61E-15	2,03E-10
1,5698	1,5705	1,7997	1,7997	5,16	3,38	3,32E+14	0	11,680	2,12E+14	0	2,12E+14	1,35E-08	4,21E+01	1,41E-15	1,10E-10
1,5704	1,5706	1,7997	1,7997	5,55	3,64	4,08E+14	0	32,444	2,60E+14	0	2,60E+14	1,10E-08	4,50E+01	3,11E-14	2,42E-09
1,5706	1,5706	1,7997	1,7997	5,95	3,9	4,94E+14	0	63,591	3,15E+14	0	3,15E+14	9,12E-09	4,80E+01	1,40E-70	1,09E-65

Tabla D.5 Resumen de la estimación para el RMS de aceleración, diferentes velocidades y porcentaje de la longitud de pared [Propia]

Porcentaje de la longitud		Velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
6%	1	-6,35	22,15	49,04	77,54	86,93	119,71
13%	4	-37,94	-9,43	17,45	45,95	60,52	96,16
19%	2	-55,82	-27,32	-0,43	28,07	42,64	83,46
26%	4	-68,30	-39,80	-12,91	15,95	30,16	70,98
33%	2	-77,89	-49,39	-22,50	6,00	20,57	61,39
39%	4	-85,68	-57,18	-30,29	-1,79	12,78	53,6
46%	2	-92,24	-63,74	-36,85	-8,35	6,22	47,04
53%	4	-97,91	-69,41	-42,52	-14,02	0,55	41,37
60%	2	-102,90	-74,40	-47,51	-19,01	-4,44	36,38
66%	4	-107,35	-78,85	-51,97	-23,46	-8,89	31,93
73%	2	-111,38	-82,88	-55,90	-27,49	-12,92	27,90
80%	4	-115,05	-86,55	-59,66	-31,16	-16,59	24,23
86%	2	-118,42	-89,92	-63,03	-34,53	-19,66	20,86
93%	4	-121,54	-93,04	-66,15	-37,65	-23,08	17,74
100%	1	-124,45	-95,94	-69,06	-40,56	-25,99	14,83

Estimación de la RMS de aceleración de la pared del domo analizado en Rao [2]

Siguiendo la figura 2.18, se inicia estimando:

- I. Espesor de la capa limite, δ^*

$$\delta^* = \frac{0.048}{(Uo*x/\nu)^{1/5}} \quad (D.10)$$

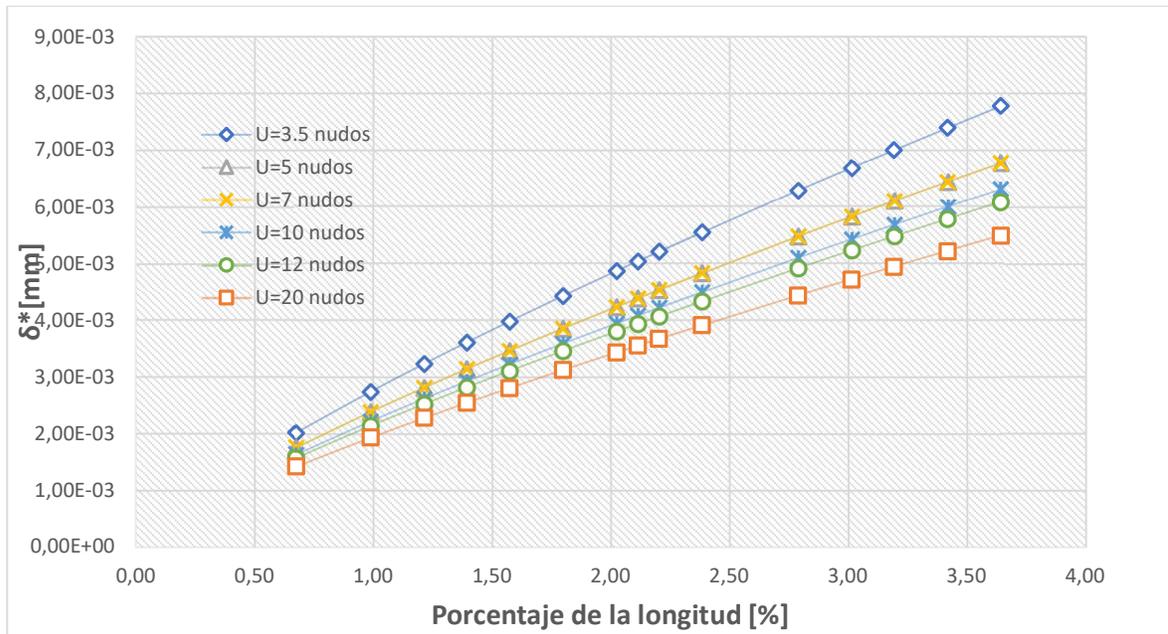


Figura D.2 Espesor de la capa limite vs porcentaje de la longitud del domo Rao [Propia]

Tabla D.6 Cálculos para la estimación del espesor de la capa limite [Propia]

Porcentaje de la longitud		Velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
0,68	0,68	2,02E-03	1,88E-03	1,76E-03	1,64E-03	1,58E-03	1,42E-03
0,99	0,99	2,74E-03	2,55E-03	2,39E-03	2,22E-03	2,14E-03	1,94E-03
1,22	1,22	3,23E-03	3,01E-03	2,81E-03	2,62E-03	2,52E-03	2,28E-03
1,40	1,40	3,61E-03	3,36E-03	3,14E-03	2,92E-03	2,82E-03	2,55E-03
1,58	1,58	3,98E-03	3,70E-03	3,46E-03	3,22E-03	3,11E-03	2,81E-03
1,80	1,80	4,42E-03	4,12E-03	3,85E-03	3,59E-03	3,46E-03	3,12E-03
2,03	2,03	4,86E-03	4,53E-03	4,23E-03	3,94E-03	3,80E-03	3,43E-03
2,21	2,21	5,20E-03	4,85E-03	4,53E-03	4,22E-03	4,07E-03	3,67E-03
2,39	2,39	5,54E-03	5,16E-03	4,82E-03	4,49E-03	4,33E-03	3,91E-03

Porcentaje de la longitud		Velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
2,12	2,12	5,03E-03	4,69E-03	4,38E-03	4,08E-03	3,93E-03	3,55E-03
2,79	2,79	6,28E-03	5,85E-03	5,47E-03	5,09E-03	4,91E-03	4,43E-03
3,02	3,02	6,68E-03	6,22E-03	5,82E-03	5,42E-03	5,22E-03	4,72E-03
3,20	3,20	7,00E-03	6,52E-03	6,10E-03	5,68E-03	5,47E-03	4,94E-03
3,42	3,42	7,39E-03	6,88E-03	6,44E-03	5,99E-03	5,78E-03	5,22E-03
3,65	3,65	7,78E-03	7,24E-03	6,77E-03	6,31E-03	6,08E-03	5,49E-03

I. Estimación de la respuesta, RMS

Tabla D.7 Dimensiones principales del domo analizado en RAO [2]

Dimensiones	
a[m]	4,5
b[m]	1,5
t[m]	0,015
E[kg/m ²]	1,35E+09
D	4,16E+02
U[m/s]	2,57E+00
Uc[m/s]	1,6705
nu[m ² /s]	1,14E-06
δ*[m]	7,24E-03
α	1,00
ρagua[kg/m ³]	1000,00
ρfibra[kg/m ³]	1570,00
A	9,22E-01
r	0,05
μ	23,55
γ[kg/m ² s]	15386

Empleando la formulación 2.16

$$S_{aa}(x, y, \omega) = \omega^4 \Phi(\omega) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{q\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) G_{ns} W_{mnqs}}{T_{mn} \cdot T_{qs} \cdot P_s \cdot P_n \cdot R_m \cdot R_q} \right] \quad (D.11)$$

A continuación, se detallan las variables empleadas en la formulación

$$T_{mn} = \left[(\omega_{mn}^2 - \omega^2) + \left(\frac{r\omega}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.12)$$

$$P_n = \left(\frac{0.7\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (D.13)$$

$$R_m = \left\{ \left[\left(\frac{0.115\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{a} - \frac{\omega}{U_c} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{0.115\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{a} + \frac{\omega}{U_c} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (D.14)$$

$$G_{ns} = 0.35 \frac{\omega b}{U_c} \delta_{ns} \left[2 \left(\frac{0.7\omega}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{s\pi}{b} \right)^2 \right] + \frac{ns}{b^2} (1 - \delta_{ns}) [(-1)^n (-1)^s - 1] + \frac{ns\pi^2}{b^2} \left\{ 2 - [(-1)^n + (-1)^s] e^{-0.7 \left(\frac{\omega b}{U_c} \right)} \right\} \quad (D.15)$$

$$W_{mnqs} = 1.0066 \frac{\omega a}{U_c} \delta_{mq} R_m \cos(v_m - 0.463\pi) \cos(\lambda_{mn} - \lambda_{qs}) + \frac{2mn\pi^2}{a^2} \cos(v_m - v_q) \cos(\lambda_{mn} - \lambda_{qs}) + \frac{mq\pi^2}{a^2} (1 - \delta_{mq}) \frac{[(-1)^m (-1)^{q-1}]}{\left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \left(\frac{q\pi}{a} \right)^2 \right]} R_m \cos(v_q + \lambda_{mn} - \lambda_{qs}) - R_q \cos(v_m + \lambda_{qs} - \lambda_{mn}) - \frac{mq}{a^2} e^{-0.115 \left(\frac{\omega a}{U_c} \right)} \left[(-1)^m \cos \left(\frac{\omega a}{U_c} + v_q + v_m + \lambda_{mn} - \lambda_{qs} \right) + (-1)^q \cos \left(\frac{\omega a}{U_c} + v_q + v_m - \lambda_{mn} + \lambda_{qs} \right) \right] \quad (D.16)$$

$$v_m = \tan^{-1} \left[\frac{0.23 \left(\frac{\omega}{U_c} \right)^2}{\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 - 0.987 \left(\frac{\omega}{U_c} \right)^2} \right] \quad (D.17)$$

$$\lambda_{qs} = \tan^{-1} \left[\frac{\gamma\omega/\mu}{\omega_{mn}^2 - \omega^2} \right] \quad (D.18)$$

Tabla D.8 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo de RAO [Propia]

f[Hz]	ω [rad/s]	m	n	q	s	x	y	wmn	wqs	Tmn	Tqs	Pn	Ps	Rm	Rq
3000	18849,6	1	1	1	1	0	0	1,29E+05	1,29E+05	1,27E+05	1,27E+05	6,24E+07	6,24E+07	1,29E+08	1,29E+08
4500	28274,3	1	3	1	3	0,30	0,10	1,06E+06	2,32E+05	1,06E+06	2,30E+05	1,40E+08	1,40E+08	2,90E+08	2,90E+08
6000	37699,1	1	5	1	5	0,60	0,20	2,91E+06	4,38E+05	2,91E+06	4,36E+05	2,50E+08	2,50E+08	5,16E+08	5,16E+08
7500	47123,9	1	7	1	7	0,90	0,30	5,69E+06	7,47E+05	5,69E+06	7,45E+05	3,90E+08	3,90E+08	8,06E+08	8,06E+08
9000	56548,7	3	1	3	1	1,20	0,40	2,32E+05	1,06E+06	2,25E+05	1,05E+06	5,61E+08	5,61E+08	1,16E+09	1,16E+09
10500	65973,4	3	3	3	3	1,50	0,50	1,16E+06	1,16E+06	1,16E+06	1,16E+06	7,64E+08	7,64E+08	1,58E+09	1,58E+09
12000	75398,2	3	5	3	5	1,80	0,60	3,01E+06	1,36E+06	3,01E+06	1,36E+06	9,98E+08	9,98E+08	2,06E+09	2,06E+09
13500	84823,0	3	7	3	7	2,10	0,70	5,79E+06	1,67E+06	5,79E+06	1,67E+06	1,26E+09	1,26E+09	2,61E+09	2,61E+09
15000	94247,8	5	1	5	1	2,40	0,80	4,38E+05	2,91E+06	4,27E+05	2,91E+06	1,56E+09	1,56E+09	3,23E+09	3,23E+09
16500	103672,6	5	3	5	3	2,70	0,90	1,36E+06	3,01E+06	1,36E+06	3,01E+06	1,89E+09	1,89E+09	3,90E+09	3,90E+09
18000	113097,3	5	5	5	5	3,00	1,00	3,22E+06	3,22E+06	3,22E+06	3,22E+06	2,25E+09	2,25E+09	4,64E+09	4,64E+09
19500	122522,1	5	7	5	7	3,30	1,10	6,00E+06	3,53E+06	6,00E+06	3,53E+06	2,64E+09	2,64E+09	5,45E+09	5,45E+09
21000	131946,9	7	1	7	1	3,60	1,20	7,47E+05	5,69E+06	7,35E+05	5,69E+06	3,06E+09	3,06E+09	6,32E+09	6,32E+09
22500	141371,7	7	3	7	3	3,90	1,30	1,67E+06	5,79E+06	1,67E+06	5,79E+06	3,51E+09	3,51E+09	7,26E+09	7,26E+09
24000	150796,4	7	5	7	5	4,20	1,40	3,53E+06	6,00E+06	3,52E+06	6,00E+06	3,99E+09	3,99E+09	8,26E+09	8,26E+09
25500	160221,2	7	7	7	7	4,50	1,50	6,31E+06	6,31E+06	6,31E+06	6,31E+06	4,51E+09	4,51E+09	9,32E+09	9,32E+09

Tabla D.9 Estimación de las variables para RMS de aceleración de la pared del domo RAO [Propia]

λ_{mn}	λ_{qs}	ν_m	ν_q	ξ	η	Gns			Wmnqs			φ		Saa	30 kHz
1,570	1,570	1,800	1,800	0,00	0	1,23E+12	0	1,23E+12	6,20E+12	0	6,20E+12	1,589E-05	0	0,00E+00	0,00E+00
1,571	1,570	1,800	1,800	0,30	0,1	4,17E+12	0	7,90E+01	2,09E+13	0	2,09E+13	4,7081E-06	0	4,44E-16	1,07E-12
1,571	1,571	1,800	1,800	0,60	0,2	9,88E+12	0	2,19E+02	4,96E+13	0	4,96E+13	1,9862E-06	0	6,20E-16	1,49E-12
1,571	1,571	1,800	1,800	0,90	0,3	1,93E+13	0	4,30E+02	9,69E+13	0	9,69E+13	1,0169E-06	0	3,75E-16	9,03E-13
1,570	1,571	1,800	1,800	1,20	0,4	3,33E+13	0	8,77E+00	1,67E+14	0	1,67E+14	5,8851E-07	0	4,03E-17	9,71E-14
1,571	1,571	1,800	1,800	1,50	0,5	5,29E+13	0	7,90E+01	2,66E+14	0	2,66E+14	3,7061E-07	0	4,10E-80	9,86E-77
1,571	1,571	1,800	1,800	1,80	0,6	7,90E+13	0	2,19E+02	3,97E+14	0	3,97E+14	2,4828E-07	0	2,00E-48	4,82E-45
1,571	1,571	1,800	1,800	2,10	0,7	1,13E+14	0	4,30E+02	5,65E+14	0	5,65E+14	1,7437E-07	0	2,50E-17	6,02E-14
1,570	1,571	1,800	1,800	2,40	0,8	1,54E+14	0	8,77E+00	7,75E+14	0	7,75E+14	1,2712E-07	0	3,87E-18	9,33E-15
1,571	1,571	1,800	1,800	2,70	0,9	2,05E+14	0	7,90E+01	1,03E+15	0	1,03E+15	9,5506E-08	0	4,55E-49	1,09E-45
1,571	1,571	1,800	1,800	3,00	1	2,67E+14	0	2,19E+02	1,34E+15	0	1,34E+15	7,3564E-08	0	4,25E-18	1,02E-14
1,571	1,571	1,800	1,800	3,30	1,1	3,39E+14	0	4,30E+02	1,70E+15	0	1,70E+15	5,786E-08	0	6,53E-19	1,57E-15
1,571	1,571	1,800	1,800	3,60	1,2	4,24E+14	0	8,77E+00	2,13E+15	0	2,13E+15	4,6326E-08	0	1,26E-19	3,04E-16
1,571	1,571	1,800	1,800	3,90	1,3	5,21E+14	0	7,90E+01	2,62E+15	0	2,62E+15	3,7665E-08	0	4,67E-20	1,12E-16
1,571	1,571	1,800	1,800	4,20	1,4	6,32E+14	0	2,19E+02	3,18E+15	0	3,18E+15	3,1035E-08	0	8,69E-19	2,09E-15
1,571	1,571	1,800	1,800	4,50	1,5	7,58E+14	0	4,30E+02	3,81E+15	0	3,81E+15	2,5874E-08	0	1,37E-77	3,30E-74

Tabla D.10 Resumen de la estimación para el RMS de aceleración, diferentes velocidades y porcentaje de la longitud de pared del domo RAO [Propia]

Porcentaje de la longitud		Velocidades					
		3,5	5	7	10	12	20
		1,799	2,57	3,598	5,14	6,168	10,28
0,35	0,35	-24,06	13,11	67,10	104,27	123,28	176,52
0,65	0,65	-31,48	5,70	40,77	77,95	96,95	150,20
1,05	1,05	-46,38	-9,20	25,87	63,04	82,05	135,29
1,45	1,45	-56,78	-19,60	15,47	52,65	71,65	124,89
1,85	1,85	-64,77	-27,59	7,48	44,66	63,66	116,90
2,25	2,25	-71,26	-34,08	0,99	38,16	57,17	110,41
2,65	2,65	-76,73	-39,55	-4,48	32,69	51,70	104,94
3,05	3,05	-81,45	-44,28	-9,21	27,97	45,39	100,22
3,45	3,45	-85,61	-48,43	-13,36	23,81	42,82	96,06
3,85	3,85	-89,32	-52,15	-17,08	20,10	39,10	92,35
4,25	4,25	-92,68	-55,50	-20,43	16,75	35,75	88,99
4,65	4,65	-95,74	-58,56	-23,49	13,69	32,69	85,93
5,05	5,05	-98,55	-61,37	-26,30	10,88	29,88	83,12
5,45	5,45	-101,15	-63,97	-28,90	8,28	27,28	80,52
5,85	5,85	-103,57	-66,39	-31,32	5,86	24,86	78,10

Estimación de la transparencia acústica del domo instalado en el BAE Orión

I. Frecuencia de coincidencia, ω_c :

$$\omega_c = \frac{c_a^2 \sqrt{12}}{c_p h} = 2\pi f_c \quad , \quad [rad/s] \quad (D.19)$$

$$\omega_c = \frac{C_w^2 \sqrt{12}}{(E/\rho_s)^{1/2} h} \quad , \quad [rad/s]$$

Para una placa plana de acero de 9 [mm] de espesor tenemos:

$$\omega_c = \frac{1500^2 \sqrt{12}}{(9,8 * 2.11E1 / 7.85E3)^{1/2} 0.009} \quad , \quad [rad/s] \quad (D.20)$$

$$\omega_c = 1.69E5 \quad , \quad [rad/s]$$

$$f_c = 26.86 \quad , \quad [KHz]$$

II. Ángulo crítico _ flexión:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{1/2} \quad [rad] \quad (D.21)$$

$$\omega_{sonar} = 1,88E5 \quad , \quad [rad/s]$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1.69E5}{1.88E5} \right)^{1/2}$$

$$\theta_c = 1.24 [rad] = 71 [^\circ]$$

III. Ángulo crítico _ compresión/ tensión:

$$\frac{c_m}{f} \text{sen}(\theta) = \frac{c_a}{f} \quad , \quad [m] \quad (D.22)$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{c_w}{c_p} \right) = \text{sen}^{-1} \left(\frac{c_w}{(E/\rho_s)^{1/2}} \right)$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{1500}{(9,8 * 2.11E10 / 7.85E3)^{1/2}} \right)$$

$$\theta_c = 0.29 [rad] = 17 [^\circ]$$

IV. **Ángulo crítico _ corte:**

$$\frac{c_m}{f} \text{sen}(\theta) = \frac{c_a}{f} \quad , \text{ [m]} \quad (\text{D.23})$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{c_w}{c_s}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{c_w}{(G/\rho_s)^{1/2}}\right)$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1500}{(9,8 * 7.99E9/7.85E3)^{1/2}}\right)$$

$$\theta_c = 0.49 \text{ [rad]} = 28[^\circ]$$

V. **Perdida por transmisión vs ángulo de incidencia**

f: 30000 [Hz] (Sonar_BAE Orión)

t: 9 [mm]

$$P_T = \frac{2P_i}{\left\{ ik \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{sen}^4 \theta \right] \cos \theta + 2 \right\}} \quad , \quad [\text{Pa}] \quad (\text{D.24})$$

$$k = \frac{\omega}{c_w}$$

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\omega h}{c_w} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{sen}^4 \theta \right] \cos \theta \right)^2 + 4}}$$

$$TL = 20 \log \left(\frac{P_T}{P_i} \right) \quad , \text{ [dB]} \quad (\text{D.25})$$

Ángulo de incidencia normal, 0°

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\omega h}{c_w} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \text{sen}^4(0^\circ) \right] \cos(0^\circ) \right)^2 + 4}}$$

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2\pi fh}{c_w} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)\right)^2 + 4}},$$

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2\pi * 30000 * 9 * 7850}{1500 * 1022.71 * 1000}\right)^2 + 4}},$$

$$\frac{P_T}{P_i} = 0.22$$

$$TL = 20\log(0.22) = 12.98 \text{ [dB]}, \text{ Valor Max.}$$

ngulo de incidencia, $70^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2\pi fh}{c_w} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \text{sen}^4(70^\circ)\right] \cos(70^\circ)\right)^2 + 4}},$$

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2\pi * 30000 * 9 * 7850}{1500 * 1022.71 * 1000} * \left[1 - \left(\frac{30000}{26855.4}\right)^2 \text{sen}^4(70^\circ)\right] \cos(70^\circ)\right)^2 + 4}}$$

$$\frac{P_T}{P_i} = 0.99$$

$$TL = 20\log(0.99) = 0,01 \text{ [dB]}, \text{ Valor Min.}$$

APÉNDICE E

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar		 Escuela Superior Politécnica del Litoral		
Evaluación de las características vibro-acústicas del diseño del domo de sonar				
Alcívar J. & Heredia E.				
Buque:	BAE ORION		Fecha:	28/1/2021
Características del Buque				
Eslora[m]	77,51	Velocidad [m/s]	3,5	
Geometría del domo				
Material	acero naval	E[kg/m²]	2,11E+10	
a[m]	5,59	psteel [kgm/m³]	7,85E+03	
b[m]	3,9	v [adi]	3,20E-01	
t[mm]	9	ρwater [kgm/m³]	1,02E+03	
Sistema Sonar				
Fabricante	Kongberg	Nivel de señal[dB]	199,5	
Frecuencia [kHz]	30	Pérdidas de transmisión [dB]	68,95	
Condiciones				
Ubicación longitudinal desde el C.G del domo hasta proa [m]		18,8	1	
Distancia del receptor con la curvatura de la pared [cm]		60	1	
Frecuencia crítica [kHz]		26,86	0	
Coeficiente de transmisión [adi]		22	1	
Espesor de pared [mm]		9	1	
Respuesta por flujo inducido en la pared del domo [dB]		-301,72	1	
Respuesta por transparencia en la pared del domo [dB]		21,43	1	
Resultados				
Nivel del señal al incluir las pérdidas por transmisión acústicas [dB]			178,41	
Ambiente acústico al interior del domo es:			Bueno	
Observaciones				Evaluador

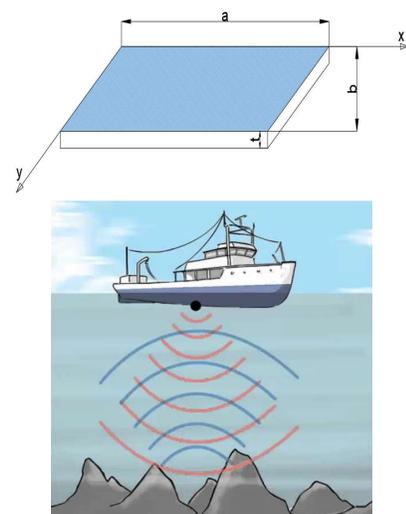


Tabla E.1 Formato para evaluar el ambiente acústico al interior del domo instalado en el BAE Orión