

**MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
GUERRA ACÚSTICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANTEPROJETO DE ARRAY REBOCADO COM ARRANJO LINEAR DE  
HIDROFONES COM MÓDULO INTERNO DE VIBRAÇÕES.**



**1ºTEN PEDRO ARAGÃO DANTAS**

Rio de Janeiro  
2023

1ºTEN PEDRO ARAGÃO DANTAS

ANTEPROJETO DE ARRAY REBOCADO COM ARRANJO LINEAR DE HIDROFONES  
COM MÓDULO INTERNO DE VIBRAÇÕES.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução  
Almirante Alexandrino como requisito parcial à  
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em  
Guerra Acústica.

Orientadores:

D. Sc. Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Capitão de Corveta Guilherme Ferreira Murrel Liali

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

1º TEN PEDRO ARAGÃO DANTAS

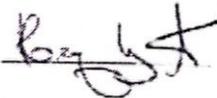
ANTI-PROJETO DE ARRAY REBOCADO COM ARRANJO LINEAR DE HIDROFONES  
COM MÓDULO INTERNO DE VIBRAÇÕES.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial  
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Acústica.

Aprovada em: 01/08/2023

Banca Examinadora:

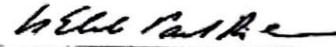
Henrique Luiz Neto, CMG(Rm1) M.Sc. - CIAA



Guilherme Ferreira Murnel Liali, M.Sc - CGAEM



Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc - UFRJ



Daniel Gama de Sousa, CC - CIAA



CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Dedico esse trabalho à minha esposa, Ana Paula Machado Bourget, suporte fundamental para que eu pudesse lograr êxito nesse estudo.

## **AGRADECIMENTOS**

Direciono meus agradecimentos:

A Deus, em primeiro lugar, por permitir que esse estudo lograsse êxito.

A todos os orixás e guias espirituais, que me intuíram e me deram forças suficiente para conclusão desse projeto.

À minha esposa, Ana Paula, em especial, por estar comigo em todos os momentos e compreender as ausências necessárias nesse período.

A toda minha família, em destaque, o meu irmão, Rodrigo por ter trilhado o caminho acadêmico, sempre apresentou ensinamentos ao longo de toda minha trajetória acadêmica; minha avó, Maria Helena e minha tia, Maria Lucia (in memoriam), professoras de formação que sempre demonstraram a importância do conhecimento para nossas vidas.

À Marinha do Brasil, pelo investimento na minha formação que tornou este projeto possível.

Aos meus orientadores, que com suas me instruíram a percorrer os melhores caminhos para o desenvolvimento de um trabalho de relevância para a comunidade científica.

Aos professores do C-Ap-GA, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Parente e ao Prof. Dr. Natanael de Moura Junior, por estar sempre disposto a ajudar principalmente, na área de programação.

" Afinal, o que é um cientista? É um homem curioso olhando por um buraco de fechadura, o buraco de fechadura da natureza, tentando saber o que está acontecendo."

Jacques-Yves Cousteau

# ANTEPROJETO DE ARRAY REBOCADO COM ARRANJO LINEAR DE HIDROFONES COM MÓDULO INTERNO DE VIBRAÇÕES.

## Resumo

Este estudo tem como propósito desenvolver um anteprojeto de um arranjo de sonar rebocado contendo dois arranjos de hidrofones lineares em paralelo, uma cauda, um VIM e cabo de reboque. Para montagem desse anteprojeto, foi realizado um estudo sobre acústica submarina e sobre equipamentos sonar e demais sensores que possam atuar no oceano. Adicionalmente, houve o respeito às limitações impostas pelas capacidades das Fragatas Classe Tamandaré.

O projeto abrange concepções gerais, parte mecânica, parte eletrônica, processamento de sinais e para avaliação de resultados se utilizou diagramas de irradiação e gráfico de previsão de alcance sonar.

Nas concepções gerais, foi abordado características a serem obedecidas e sobre a solução do problema de ambiguidade do *array* linear. Na parte mecânica, foram estabelecidos os materiais de todos os componentes do arranjo, bem como conexões. Na parte eletrônica, estão especificados os hidrofones, método para aquisição de sinais e pré-amplificadores. Finalizando o projeto, os diagramas de irradiação e gráficos de previsão, mostram a eficiência do arranjo perante a outros sensores, explicitando o quão bem o sensor consegue distinguir a direção de uma ameaça e o quão distante consegue detectar um alvo.

**Palavras- chave:** Acústica Submarina, *Towed Array Sonar*, VIM, Previsão de Alcance Sonar e Diagramas de Irradiação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre frequência, atenuação, velocidade de propagação e comprimento de onda de uma onda eletromagnética. ....	25
Figura 2 - Exemplo de comportamento da salinidade no ambiente marinho. Dados do Pacífico Sul da década de 1970-80.....	28
Figura 3 - Comportamento da temperatura(a) e da velocidade do som(b) diante das profundidades do oceano. ....	29
Figura 4 – Exemplo de Duto de Superfície. ....	36
Figura 5 – Exemplo de Canal SOFAR. ....	36
Figura 6 – Exemplo de Zona de Convergência. ....	37
Figura 7 – Exemplo de arranjo linear .....	48
Figura 8 – Exemplo de Sonoboia. ....	52
Figura 9 – Modelo ilustrativo da Fragata Tamandaré. ....	57
Figura 10 – Esquema de Sensores e Armamento das FCT. ....	58
Figura 11 – TAS em container. ....	60
Figura 12 – Modelo de Arranjo.....	62
Figura 13 – Esquema de um triplet de sensores e de dois arranjos lineares em paralelo. ....	63
Figura 14 – Arranjo linear ampliado. ....	64
Figura 15 – Corte Transversal do Cabo de Reboque de diâmetro externo de 22.8 mm.....	67
Figura 16 – Modelo do Arranjo do Experimento. ....	67
Figura 17 – Modelo de VIM.....	68

Figura 18 – Montagem do Hidrofone. ....	71
Figura 19 - Esquema da Espuma de Poliuretano.....	71
Figura 20 – Adaptador.....	71
Figura 21 – Adaptador MHDO.....	72
Figura 22- Adaptador e olhal para o VIM. ....	73
Figura 23 – Hidrofone BII 7141.....	74
Figura 24 – Placa de Aquisição de Áudio TASCAM US800. ....	76

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Ruído ambiente por faixa de frequência.....	43
Tabela 2 - Dados Característicos da FCT.....	57
Tabela 3 – Especificações técnicas do hidrofone. ....	74
Tabela 4 – Especificações Técnicas dos Pré-Amplificadores. ....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 500 Hz.....	77
Gráfico 2 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 100 Hz.....	79
Gráfico 3 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 250 Hz.....	79
Gráfico 4 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 750 Hz.....	80
Gráfico 5 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 1000 Hz.....	80
Gráfico 6 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 500 Hz.....	81
Gráfico 7 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 500 Hz.....	81
Gráfico 8 – Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a $20 \log R$ . ....	83
Gráfico 9 - Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a $20 \log R + \alpha R$ , utilizando 500Hz de frequência. ....	84
Gráfico 10 - Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a $20 \log R + \alpha R$ , utilizando 10KHz de frequência.....	85
Gráfico 11 - Alcance Sonar em função da Frequência do sinal adquirido para um modelo de Perdas na propagação igual a $20 \log R + \alpha R$ , utilizando 30dB de nível de ruído.....	86
Gráfico 12 - Alcance Sonar em função do nível de ruído e da Frequência do sinal adquirido para um modelo de Perdas na propagação igual a $20 \log R + \alpha R$ . ....	87

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASW – *Anti-submarine Warfare* – Guerra Antissubmarino.

ATAS – *Active Towed Array Sonar* – Arranjo de Sonar Rebocado Ativo.

CGAEM – Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha.

CMS – *Combat Management System* – Sistema de Gerenciamento de Combate.

END – Estratégia Nacional de Defesa.

EUA – Estados Unidos da América.

FCN – Fragatas Classe Niterói.

FCT – Fragatas Classe Tamandaré.

IEAPM - Instituto de Estudo do Mar Almirante Paulo Moreira.

IPqM – Instituto de Pesquisas da Marinha.

IPMS – *Integrated Platform Management System* – Sistema de Gerenciamento Integrado de Plataforma.

MB – Marinha do Brasil.

OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte.

PLA – *Polylactic Acid* (Ácido Polilático).

PND - Política Nacional de Defesa.

PEM – Plano Estratégico da Marinha.

PUF – Espuma de Poliuretano.

PTFE - Fita de Politetrafluoroetileno.

SOFAR - *Sound Fixing and Ranging Channel*.

SONAT – Sonar Ativo Nacional.

TAS – *Towed Array Sonar* – Arranjo de Sonar Rebocado.

ToT – *Transfer of Technology* – Transferência de Tecnologia.

TKMS – *ThyssenKrupp Marine System*.

TPU – *Thermo-Plastic Urethane* (Poliuretano Termoplástico).

ULA – *Uniform Linear Array* – Arranjo Linear Uniforme.

URSS – União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

VDS – *Variable Depth Sonar* – Sonar de Profundidade Variável.

ZEE – Zona Econômica Exclusiva.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Sigma$  - Símbolo de somatório.

$\alpha$  - Coeficiente de absorção, medido em decibéis por milhares de jarda.

atm – pressão de 1 atmosfera.

c – Velocidade do Som.

°C – Graus Celsius.

D - Razão entre a intensidade na direção do eixo acústico da fonte direcional e a intensidade da fonte omnidirecional.

dB – decibel.

DI – *Receiving Directivity Index* – Índice de diretividade.

DT – *Detection Threshold* – Limiar de detecção.

$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$  – Derivada parcial de segunda ordem em função do tempo.

$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$  - Derivada parcial de segunda ordem em função do espaço.

E - Elasticidade do meio.

EL – *Echo level* – Nível de relação echo-ruído.

$\Phi$  – Direção do sinal.

f – frequência.

f/fo – frequência do sinal dividido pela frequência do projeto.

H( $\theta$ ) - Fator direcional (normalizado para valor máximo unitário).

Hz – Hertz.

I<sub>0</sub> – Intensidade Acústica incidente a um 1 m do centro acústico (ponto de referência) da fonte sonora.

I<sub>1</sub> - Intensidade Acústica na posição de interesse (alvo ou hidrofone).

K – Número de onda.

KHz – Quilohertz.

$\lambda$  – Comprimento de onda.

log – Logaritmo.

MHz – MegaHertz.

m – Metro.

M – Número de linhas do arranjo.

m/s – Metros por segundo.

n – Número de hidrofones por linha.

N – *Noise* – Ruído.

NL – *Noise Level* – Nível de ruído.

NRI – Nível de ruído irradiado.

$\pi$  - Contante matemática aproximadamente igual a 3,141.

pH – Grandeza que serve para medir o potencial de hidrogênio em uma solução.

P – Potência do Sinal.

$P_0$  – Potência Acústica incidente a um 1 m do centro acústico (ponto de referência) da fonte sonora.

$P_1$  - Potência Acústica na posição de interesse (alvo ou hidrofone).

p – Pressão.

$\theta$  - Ângulos em radianos.

$\rho$  – Densidade do meio.

$\rho_c$  - Impedância acústica.

r – Distância/alcance.

R – Coeficiente de reflexão especular.

RL – *Reverberation Level* – Nível de Reverberação.

$s_n(t)$  – Sinal acústico n que varia no tempo.

S – Salinidade.

SL – *Source Level* – Nível de Potência sonora transmitida.

SNR – *Signal to noise* – Relação sinal-ruído.

$\tau$  – Retardo do sinal.

t – Tempo.

T – Temperatura.

TL – *Transmission Loss* – Perdas na Transmissão.

TS – *Target Strenght* – Poder de Reflexão do Alvo.

W – Comprimento do arranjo.

y(t) – Sinal de saída no tempo.

Z – Profundidade.

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 – Sonar .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 – Programa Fragata Classe Tamandaré .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3 – Objetivo .....</b>	<b>23</b>
1.3.1 – Objetivos Geral.....	23
1.3.2 – Objetivos Específicos .....	23
<b>1.4 – Etapas do Trabalho .....</b>	<b>23</b>
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TRABALHO.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 – Ondas Acústicas x Ondas Eletromagnéticas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 – O som e sua propagação.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 – Estratificação do Som no mar .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 – Perdas na Propagação do Som no Mar .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 – Divergência.....	30
2.4.2 – Absorção .....	31
2.4.3 – Espalhamento e Reverberação.....	33
2.4.4 – Reflexão.....	34
2.4.5 – Refração.....	35
<b>2.5 – Equações do Sonar .....</b>	<b>38</b>

2.5.1 – Equação Sonar Ativo .....	38
2.5.2 – Equação Sonar Passivo .....	39
2.5.3 – Limiar de Detecção (DT).....	39
2.5.4 – Índice de Diretividade (DI).....	40
2.5.5 – Nível de Ruído Irradiado (SL).....	41
<b>2.6 – Nível de Ruído (NL).....</b>	<b>41</b>
2.6.1 – Ruído Próprio .....	41
2.6.2 – Ruído Ambiente.....	42
<b>2.7 – Equipamentos Acústicos Submarinos.....</b>	<b>43</b>
2.7.1 – Transdutores .....	44
2.7.2 – Hidrofonos .....	45
2.7.3 – Arranjos ( <i>Arrays</i> ).....	47
<b>2.7.3.1 – Arranjo Linear.....</b>	<b>47</b>
<b>2.7.3.2 – Arranjos Bidimensionais.....</b>	<b>49</b>
<b>2.7.3.3 – Arranjos Volumétricos.....</b>	<b>50</b>
<b>2.8 – Aplicações de Sistemas Acústicos.....</b>	<b>51</b>
2.8.1 – Sonoboias .....	51
2.8.2 – Sonar de Casco .....	52
2.8.3 – Sonar de Profundidade Variável (VDS) .....	53
2.8.4 – Arranjo de Sonar Rebocado (Towed Array Sonar) .....	53

<b>3 – FRAGATAS CLASSE TAMANDARÉ .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 – Conceitos Gerais .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 – Construção e Composição.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3 – Relação com a Guerra Antissubmarino .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4 – Limitações físicas para o anteprojeto. ....</b>	<b>59</b>
<b>4 – ANTEPROJETO DE SONAR REBOCADO .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 – Composição geral.....</b>	<b>61</b>
4.1.1 – Frequência ótima e espaçamento de hidrofones .....	62
4.1.2 – Dispositivo de eliminação de ambiguidade esquerda-direita e número de hidrofones.	62
<b>4.2 – Mecânica.....</b>	<b>65</b>
4.2.1 – Cabo de Reboque.....	65
4.2.2 – Cauda .....	67
4.2.3 – VIM .....	68
4.2.4 – Diâmetro do arranjo.....	69
4.2.5 – Materiais e montagem do Arranjo. ....	70
<b>4.3 – Eletrônica .....</b>	<b>73</b>
4.3.1 – Hidrofones. ....	73
4.3.2 – Pré-Amplificadores.....	74
4.3.3 – Cabos Elétricos. ....	75
4.3.4 – Placa de Aquisição do Sinal. ....	75

<b>4.4 – Processamento Digital de Sinais.....</b>	<b>76</b>
<b>4.5 – Avaliação de Eficácia do Arranjo. ....</b>	<b>77</b>
4.5.1 – Diagrama de Irradiação. ....	77
4.5.2 – Previsão de Alcance Sonar. ....	82
<b>5 – DISCUSSÃO. ....</b>	<b>87</b>
<b>5.1 – Emprego em demais áreas. ....</b>	<b>88</b>
<b>5.2 – Conclusão. ....</b>	<b>88</b>
<b>5.3 – Sugestões para trabalhos futuros. ....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>
<b>APENDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO DO PROTÓTIPO. ....</b>	<b>98</b>
<b>APENDICE B – CÓDIGO EM PYTHON PARA ALCANCE SONAR. ....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A – VISTAS DO PROTÓTIPO DE VIM.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO B – DESENHO DE CONECTOR MHDO. ....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO C – ALGORITMO EM PYTHON PARA CÁLCULO DA SENSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CHEGADA DO SINAL DO ARRANJO.....</b>	<b>111</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

A END é o documento que rege toda a estratégia de Defesa do País, estabelecendo a missão da MB em:

“A Marinha do Brasil tem como missão preparar e empregar o Poder Naval, a fim de contribuir para a defesa da Pátria; para a garantia dos poderes constitucionais e, por iniciativa de qualquer destes, da lei e da ordem; para o cumprimento das atribuições subsidiárias previstas em lei; e para o apoio à política externa.” (BRASIL; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2020, p. 47).

Desta forma, cabe definir o Poder Naval como parte do Poder Marítimo ligado área militar. A END, também detalha as tarefas básicas do Poder Naval em: “controle de área marítima; negação do uso do mar; projeção de poder sobre terra; e contribuição para a dissuasão.” (1)

Dentro destas concepções, a Força Naval Brasileira deve elaborar estratégias e planos próprios para atender às demandas que a nação impõe. Neste ínterim, o PEM eleva a consciência estratégica sobre a vasta quantidade dos recursos tanto naturais quanto econômicos contidas no mar territorial nacional e da necessidade de defendê-los. Para executar essa missão com êxito, faz-se necessário a constante modernização tecnológica a fim de produzir meios navais capacitados para defender os interesses da pátria. (2)

De encontro aos desafios impostos e da crescente necessidade de aumentar a capacidade de combate no mar, surge o Programa de Construção das Fragatas Classe Tamandaré. Esse projeto traz inovações tecnológicas, aumentando a capacidade de combate nos diversos ambientes de guerra naval (superfície, aéreo e submarino). Adicionalmente, o Programa trará benefícios indiretos ao país, fomentando a indústria de defesa nacional, com a consequente geração de empregos. (3)

Dentre as capacidades da futura classe de navios, a que mais será trabalhada nesse estudo será sobre a possibilidade de exploração do meio oceanográfico em termos de combate no mar. Apesar de amplas as utilidades, o meio subaquático só começou a ser explorado em termos bélicos no início do século XX, com advento de submarinos, ainda de forma rudimentar. (4) Durante a Segunda Guerra Mundial, os Aliados encontraram uma série de desafios ao lidar

com os submarinos alemães conhecidos como "U-boats". Pois na época, os métodos de detecção, identificação e classificação dessas unidades eram muito ineficientes. (5)

Durante a corrida armamentista promovida pelos EUA e pela URSS até o final da década 1980-90, os soviéticos como contraponto aos norte-americanos utilizaram uma estratégia de produção massiva em submarinos, em particular, os com capacidade de emprego de armamento nuclear. (6) Devido ao crescimento desse tipo de unidade, as diversas nações do bloco ocidental se viram em situação de urgência para desenvolver tecnologias capazes para detectar, identificar e neutralizar essa ameaça. Como já era de conhecimento que a propagação das ondas eletromagnéticas possui elevada atenuação no volume da água oceânica, os estudos no campo da acústica se fizeram inevitáveis. (7) Desta forma, a evolução dos sensores com capacidade de captação de ondas sonoras no oceano cresceu vertiginosamente. Desde o final da Segunda Guerra Mundial (1939-45), as evoluções desses equipamentos passaram por: sonares de casco em navios de superfície, sonar de profundidade variável em navios de superfície e em meios aeronavais, sonoboias e arranjo de sonares rebocados em navios de superfície.

Diante das evoluções tecnológicas observadas, faz-se necessário que o Brasil invista em tecnologia de Defesa para garantir o cumprimento das estratégias propostas. O desenvolvimento em tecnologia nacional traz uma vasta gama de benefícios diretos e indiretos, cita-se: aumento da capacidade da indústria, e conseqüentemente, da geração de empregos; maior independência tecnológica em relação a outros países; maior facilidade logística; aumento de ativos de defesa, podendo abrir a possibilidade do país se tornar exportador de tecnologia naval qualificada. (1)

Dada a importância do desenvolvimento tecnológico para a Defesa Nacional, os estudos sobre acústica submarina na MB, estão sob égide do CGAEM, do IPQM e do IEAPM. O primeiro tem por objetivos um Estudo voltado para Inteligência Operacional e o segundo realiza estudos de forma a desenvolver Sistemas de Monitoramento, sensores e o último realiza estudos sobre o ambiente marinho. Neste ínterim, tecnologias nas áreas de sensores hidroacústicos, formação de feixes, detecção, acompanhamento e classificação de contatos de interesse e processamento de sinais vêm sendo desenvolvidas.

## **1.1 – Sonar**

Ao longo do tempo, o sonar demonstrou-se como a forma mais eficiente de detecção e identificação de submarinos imersos no oceano. Esse sensor pode ser dividido entre duas formas de obtenção de sinal: passivo e ativo. O sistema ativo é aquele em que se emite um sinal e se recebe um eco do sinal enviado, já o passivo só capta os sons contidos no meio em que está inserido. (8)

Diante das definições, no campo da detecção de submarinos, surgem diversas problemáticas como: o comportamento da onda sonora em ambiente não homogêneo; a diversidade de ruídos marinhos que podem atenuar a intensidade sonora ao longo do tempo; e os ruídos do próprio navio de superfície que pode interferir nessa captação da onda. (9)

De forma a suplantando essas dificuldades, as inovações tecnológicas foram gradativamente evoluindo, até chegarem ao sistema de arranjos de sonares rebocados presentes em navios de superfície. Pois, dessa maneira, permite um afastamento dos níveis de ruído do próprio operador do sistema e um aumento de ganho do sinal, possibilitando um maior alcance.

Ainda assim, esse sistema possui desafios de detecção, que particularmente, operando em modo passivo, podem ser categorizados nas seguintes áreas: necessidade de sensores com sensibilidade o suficiente para detectar o sinal de interesse e um sistema de processamento de sinal robusto a fim de extrair as características de interesse que permitam detectar, classificar e identificar um alvo através desse sinal sonoro. (10)

## **1.2 – Programa Fragata Classe Tamandaré**

O Programa tem o intuito de prover a renovação da Esquadra brasileira em quatro Navios-Escorta modernos com alto nível tecnológico e alto grau de nacionalização. Os navios estão sendo construídos com o propósito de realizarem controle de área marítima em território jurisdicional e nas ZEE do Brasil. Além da área de defesa, esse programa está revestido de outros objetivos que fomentam as seguintes áreas: Indústria Naval, geração de mão de obra técnica qualificada, geração de renda, empregos e tecnologia sensível. (3)

O programa prevê a construção de quatro fragatas leves, equipadas com sensores e armamentos com capacidade de combate em Guerra de Superfície, Guerra Antiaérea e Guerra

Antissubmarino. Essa classe de navio está sendo construída pelo consórcio Águas Azuis, formado pelas empresas: Thyssenkrupp Marine Systems, Embraer Defesa & Segurança e Atech. Devido ao investimento da MB, essas quatro plataformas de superfície serão o futuro do poder combatente da Esquadra brasileira. Portanto, é imperativo que qualquer projeto relacionado a armamentos ou sensores navais destinados a embarcações de superfície seja concebido considerando sua aplicação nas FCT.

### **1.3 – Objetivo**

#### **1.3.1 – Objetivos Geral**

Propor o desenvolvimento de um Sistema de Arranjo de Sonares Rebocados para implantação nas FCT. Esta proposta objetiva salienta o quanto a nova tecnologia aumentaria a capacidade da Esquadra de combate no mar, fortalecendo sua capacidade de exercer controle de área marítima e a se contrapor a um agente adverso que possua meios navais submarinos. Desta forma, esta medida visa cumprir os objetivos previstos na END e na PND, ao contribuir para a defesa das águas jurisdicionais e da ZEE brasileira.

#### **1.3.2 – Objetivos Específicos**

Realizar uma análise preliminar do arcabouço teórico relacionado à propagação do som no ambiente marítimo. Em seguida, examinar a eficácia dos sensores utilizados na ASW por navios de superfície. Posteriormente, avaliar o avanço tecnológico que um Sistema de TAS traria em comparação com os sensores atuais de embarcações de superfície no contexto da capacidade de ASW. Subsequentemente, avaliar a capacidade de detecção do TAS. Finalmente, explorar a viabilidade de aplicar esse sensor em outras áreas de conhecimento além da defesa.

### **1.4 – Etapas do Trabalho**

Visando a melhor compreensão do referido tema, a linha de pesquisa abordada foi subdividida da seguinte forma:

- No capítulo 2 é abordada uma fundamentação teórica sobre o fenômeno do som e dos Equipamentos acústicos de forma necessária para compreensão dos temas abordados nos capítulos subsequentes.

- No capítulo 3 é sobre o como o Programa de Construção das Fragatas Tamandaré está pautado. Quais as limitações que ele gera para implantar um *array* rebocado na classe de Navios. Assim como explicitar os benefícios, vantagens e limitações que o Programa ainda possui para Guerra Antissubmarino.
- No capítulo 4 será realizado o anteprojeto de um Arranjo de Sonar Rebocado para a Marinha do Brasil.
- No capítulo 5 serão realizadas as discussões finais sobre o projeto compostas por: uma verificação quanto a possibilidade da utilização do protótipo em outras áreas; uma conclusão baseada nos resultados; e por último, estimativas acerca de uma projeção para trabalhos futuros de forma mais aprofundada no tema, visando seu desenvolvimento e aplicação de forma efetiva.

## **2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TRABALHO**

Em virtude da ampla magnitude de conceitos teóricos que são aplicados em acústica oceânica e as dificuldades encontradas em estudar o comportamento do som em um meio heterogêneo, cabe a este estudo, apresentar esses fatores previamente a fim de facilitar a compreensão do leitor sobre a temática.

Neste contexto, esse capítulo introduzirá os seguintes tópicos conceituais:

- Onda sonora x Onda eletromagnética;
- O Som e sua propagação;
- Estratificação do Mar;
- Perdas na Propagação de Ondas Acústicas no Mar;
- Equações Sonar;
- Nível de Ruído (NL);
- Equipamentos Acústicos Submarinos; e
- Aplicações em Sistemas Acústicos.

### **2.1 – Ondas Acústicas x Ondas Eletromagnéticas**

O estudo das ondas eletromagnéticas no ambiente marinho foi reduzindo ao longo do século passado devido a estas sofrerem grande atenuação em meios que contenham alta

condutividade. Esta premissa pode ser ilustrada pela figura 1, onde aponta-se menores valores de velocidade e maior atenuação para ambientes onde o nível de condutividade é maior como o marinho. (7)

		Frequência					
		100 Hz	1 KHz	10 KHz	100 KHz	1 MHz	10 MHz
Velocidade de propagação (m/s)	Água do mar	$1.58 \times 10^4$	$5.00 \times 10^4$	$1.58 \times 10^5$	$5.00 \times 10^5$	$1.60 \times 10^6$	$4.97 \times 10^6$
	Água doce	$3.16 \times 10^5$	$1.00 \times 10^6$	$3.16 \times 10^6$	$1.00 \times 10^7$	$2.56 \times 10^7$	$3.33 \times 10^7$
	Ar	$3.00 \times 10^8$					
Comprimento de onda (m)	Água do mar	$1.58 \times 10^2$	$5.00 \times 10^1$	$1.58 \times 10^1$	$5.00 \times 10^0$	$1.56 \times 10^0$	$5.00 \times 10^{-1}$
	Água doce	$3.16 \times 10^3$	$1.00 \times 10^3$	$3.16 \times 10^2$	$1.00 \times 10^2$	$2.53 \times 10^1$	$3.37 \times 10^0$
	Ar	$3.00 \times 10^6$	$3.00 \times 10^5$	$3.00 \times 10^4$	$3.00 \times 10^3$	$3.00 \times 10^2$	$3.00 \times 10^1$
Distância de propagação (m) para 100 dB de atenuação	Água do mar	$3.23 \times 10^2$	$8.92 \times 10^1$	$2.79 \times 10^1$	$8.81 \times 10^0$	$2.82 \times 10^0$	$9.40 \times 10^{-1}$
	Água doce	$5.78 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$5.78 \times 10^2$	$1.83 \times 10^2$	$7.14 \times 10^1$	$5.50 \times 10^1$

Figura 1 - Relação entre frequência, atenuação, velocidade de propagação e comprimento de onda de uma onda eletromagnética. (7)

Diante desse contexto, as ondas eletromagnéticas, mesmo quando empregadas com baixas frequências, só poderiam ser utilizadas em ambientes marinhos em baixas profundidades e com distâncias pequenas. Desta forma, torna-se inviável utilizar esse tipo de onda para detecção de submarinos, que podem estar a centenas de metros abaixo da superfície da água.

Dado o exposto, é preciso utilizar outro tipo de onda para identificar meios que operem abaixo da superfície da água. As ondas sonoras abrem a possibilidade para a solução da problemática. (9) Diferentemente, das ondas eletromagnéticas, as ondas acústicas aumentam de velocidade em meios líquidos e sofrem uma atenuação menos vertiginosa no mar. Embora o uso dessa onda seja uma solução possível para uso na ASW, se apresenta de forma complexa, pois cada camada submarina apresenta uma influência diferente na propagação da onda, tornando o cálculo de detecção mais difícil. Perante o desafio da questão proposta, resta ao estudo presente, apresentar as características dessa onda, assim como, quais influências sofridas por ela no ambiente em questão.

## 2.2 – O som e sua propagação

O som pode ser definido como uma onda mecânica gerada através da vibração de objetos materiais, tal onda é denominada onda acústica. Diante do exposto, ela se propaga através de um meio e carrega informações e energia. Seres humanos são capazes de interpretar sons porque essas ondas incidem sobre o ouvido que captam a pressão, o qual transforma energia mecânica em sinais elétricos, possibilitando, assim, que o cérebro processe esses sinais. (12)

A faixa audível de frequência para humanos está entre 20 Hz e 20 kHz, faixas menores são chamadas de infrassons e acima de ultrassons. As características do som estão altamente correlacionadas com o meio em que se propaga. Por essa razão, a velocidade do som pode ser significativamente afetada pelas propriedades dos meios. No caso específico do mar, a variação da temperatura, da salinidade e da pressão provoca atenuação ou distorção das ondas sonoras. Desta forma, o som pode se propagar de maneiras diferentes nos diversos meios; por exemplo, em média, na atmosfera terrestre, a velocidade do som é de aproximadamente 320 metros por segundo, enquanto no mar, é de em torno de 1500 metros por segundo. (12)

A propagação do som se dá por uma sequência de compressões e rarefações de um meio elástico. O funcionamento pode ser explicado da seguinte forma: uma região de um meio elástico é comprimida induzindo o surgimento de uma força que tende a expansão que comprime áreas próximas. A região expandida torna-se rarefeita, este fenômeno revela uma força de restauração que busca a situação de equilíbrio do sistema. As camadas adjacentes, continuamente, possuem um comportamento semelhante. Finalmente, conclui-se que nesse movimento ocorre a transmissão de energia mecânica potencial, camada a camada, seja por compressão, ou por rarefação. As partículas do meio seguem este padrão de movimento, gerando um componente de velocidade de propagação, ou seja, há Energia cinética dentro da componente de energia mecânica sendo transmitida. Essa velocidade pode ser descrita matematicamente pela equação 1: (13)

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

Na onda acústica uma das relações mais importantes que pode se extrair é a correlação dos efeitos da pressão com relação ao espaço e com relação ao tempo. Desta forma, a equação de onda sonora unidirecional pode ser descrita matematicamente pela equação 2: (14)

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

### 2.3 – Estratificação do Som no mar

Diante das definições das relações para as ondas sonoras em meio elástico genérico, cabe a esse estudo particularizar as relações da onda acústica em meio marinho. Contudo, como descrito na seção 2.1, esta tarefa é complexa devido as características do mar. A fórmula matemática que será adotada está expressa na equação 3 foi descrita por (11) como:

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016Z \quad (3)$$

Onde, T é expressa em °C, S é expressa por (em parte por milhar (‰)), e Z é expressa em m e c é expressa em m/s. A equação é válida nos seguintes intervalos: 0 °C < T < 35°C; 0 < S < 45‰; e 0 < Z < 1000m.

Diante da equação apresentada, a velocidade de som sofrerá mais influência da temperatura dos oceanos. Em um recorte vertical do mar, a pressão aumenta 1atm a cada 10 metros de coluna de água, contudo, em um recorte horizontal, possui comportamento isobárico. Já a profundidade possuirá mais influência na velocidade de propagação enquanto a onda passar por camadas isotérmicas. A influência da temperatura poderá ser vista mais a frente enquanto for abordada as camadas de temperatura dos oceanos. A salinidade poderá ser considerada com distribuição homogênea em grande parte do oceano, logo terá pouco influência nas variações de velocidade dentro das camadas marinhas. Esse comportamento da salinidade pode ser ilustrado pela figura 2.

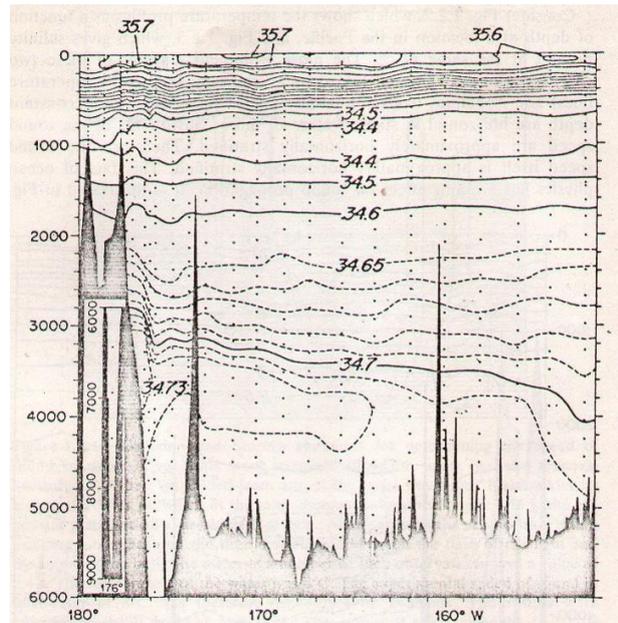


Figura 2 - Exemplo de comportamento da salinidade no ambiente marinho. Dados do Pacífico Sul da década de 1970-80. (11)

A temperatura, em efeitos práticos, permanecerá constante para uma mesma profundidade. Desta forma, ao fazer um recorte vertical da massa de água oceânica, pode-se dividir essas regiões nas seguintes camadas: Camada de Mistura, Termoclina e Camada Abissal.

A primeira camada de estratificação vertical da temperatura do mar se caracteriza por possuir uma distribuição de temperatura constante, mesmo com o decaimento da profundidade. Caracteriza-se dessa forma, pois nessa camada, o mar sofre diversas influências de temperatura atmosférica, que com o fenômeno de convecção proporciona essa mistura na água. De forma que, quanto mais houver resfriamento da superfície, maior é esta camada. Já, a precipitação e o aquecimento fazem com que a camada reduza. Ao todo, ela varia, geralmente, entre 100 e 200 metros. (15)

Na segunda estratificação, a temperatura diminui rapidamente à medida que a profundidade aumenta. Essa estratificação pode ser compreendida por meio de dois processos fundamentais. Primeiramente, verticalmente, ocorre uma transferência descendente de calor e uma ascensão ascendente, resultando em um perfil exponencial de temperatura. O segundo processo, de natureza horizontal, envolve as águas presentes na termoclina de regiões subtropicais, que têm origem nas águas superficiais das áreas mais próximas aos polos. Essas águas mais superficiais alcançam camadas mais profundas por meio de subducção. A interação

dessas múltiplas camadas que passam pelo processo de subducção resulta na formação da termoclina. (15)

Na terceira camada, a temperatura decresce lentamente conforme a profundidade aumenta. Contudo nas zonas mais profundas dessa camada, não há fonte de calor então a temperatura se manteria perto da constância. (15)

O comportamento da temperatura e velocidade do som dadas as influências sofridas pelas três camadas categorizadas podem ser ilustradas pela figura 3.

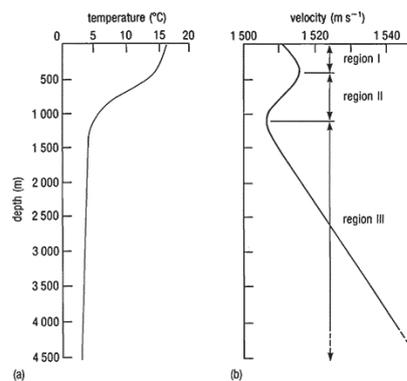


Figura 3 - Comportamento da temperatura(a) e da velocidade do som(b) diante das profundidades do oceano.

(16)

Pode ser observado pela figura 3 que o comportamento da velocidade do som até a termoclina tem influência preponderante da temperatura, porém quando passamos a profundidades de zonas abissais onde a temperatura tem uma variação menor, a pressão passa a ser preponderante para o cálculo da velocidade do som.

## 2.4 – Perdas na Propagação do Som no Mar

Nesse tópico, serão estudados os efeitos do mar sobre a energia acústica e sobre a direção de propagação da onda.

O sinal sonoro no meio oceânico pode sofrer as seguintes condições: atraso, enfraquecimento e distorções. Tais perdas se dão por sua forma e pelos mecanismos de atenuação em si. Matematicamente, essas atenuações, neste estudo serão expressas pela equação 4 como:(9)

$$TL(r) = 10\log \frac{I_0}{I_1(r)} = 20\log \frac{P_0}{P_1(r)} \text{ dB} \quad (\text{Eq.4})$$

Essas perdas podem ter diversos efeitos e as perdas totais são descritas como o somatório das demais perdas. Como pode ser visto pela equação 5:

$$TL = TL_{\text{Geom}} + TL_{\text{Absor}} + TL_{\text{Outros}} \quad (\text{Eq.5})$$

Os seguintes efeitos perturbam a propagação do som e interagem diretamente com a confiabilidade das informações aferidas nos sensores: Divergência; Absorção; Espalhamento e Reverberação; Reflexão; e Refração.

#### 2.4.1 – Divergência

A perda por divergência representa o efeito geométrico, o desvanecimento da energia sonora em função da distância percorrida a partir do afastamento da fonte. A queda de intensidade da energia irradiada é proporcional ao quadrado da distância percorrida e é obtida através da equação: (17)

$$I_1(r) = \frac{I_0}{r^2} = \frac{I(r = 1\text{m})}{4\pi r^2} \quad (6)$$

No caso particular de um sonar, será considerado: divergências esféricas e cilíndricas. A esférica está associada à propagação por ondas esféricas. Esse modelo descreve a propagação em um modelo ideal, em meio homogêneo, sem interferências de fronteiras ou obstáculos. Este modelo idealizado, é utilizado em distância menores e em testes laboratoriais. A pressão acústica neste caso, é distribuída em uma esfera de raio  $r$  centrada na fonte. A representação dessa perda pode ser descrita pela equação 7 como: (17)

$$TL_{\text{Geom}} = 20\log \frac{P_0}{P_1} = 20\log \frac{P_0}{\frac{P_0}{r}} = 20\log r \quad (7)$$

Pode ser considerado, que nesse modelo ideal o som se propague em todas as direções com velocidade constante e perpendicular às frentes de onda. As perdas, nessa situação são

traduzidas como a relação entre Potência sonora e a área na qual o fluxo de energia sonora perpassa. (17)

As perdas cilíndricas se caracterizam pelo caso particular de as fontes acústicas estiverem localizadas entre duas superfícies planas paralelas perfeitamente refletoras, então, a distribuição da potência acústica dessa fonte estará distribuída em uma superfície cilíndrica. A caracterização desse processo será expressa pela equação 8 como: (17)

$$TL_{\text{Geom}} = 20\log \frac{P_0}{P_1} = 20\log \frac{P_0}{\frac{P_0}{\sqrt{r}}} = 10\log r \quad (8)$$

Normalmente, o modelo de perdas cilíndricas é utilizado em adição ao de perdas esféricas, empregando o que melhor se adequar à modelagem acústica em questão.

Entretanto, em quaisquer situações, a intensidade do som é atenuada na água de forma acentuada. Esse fato corrobora para o uso de feixes direcionais em aplicações práticas como em ecobatímetros e sonares.

#### 2.4.2 – Absorção

O cenário ideal da propagação acústica seria estar em um ambiente controlado adiabático, onde não haveria absorção, ou seja, quando as variações de pressões sofridos pela onda sonora não geram atenuação da energia. (17)

Há três mecanismos que contribuem para o aumento das perdas por absorção: a viscosidade de cisalhamento, a viscosidade de volume e o relaxamento iônico, que atua principalmente em frequências mais baixas. Essas perdas podem ser compiladas na seguinte equação 9 como: (18)

$$\alpha = \frac{0.1f^2}{1 + f^2} + \frac{40f^2}{4100 + f} \quad (9)$$

Contudo, a aproximação de Thorp foi extraída de uma média no Atlântico Norte, tendo como parâmetro somente a frequência. Dentre os modelos mais aceitos atualmente, incluindo a relaxação iônica pelo ácido bórico e o sulfato de magnésio mais a viscosidade, vai ser utilizado o modelo François–Garrison, onde o coeficiente de absorção é dependente da temperatura,

salinidade, pressão, frequência, profundidade e pH. Esse modelo está descrito pela Equação 10:(18)

$$TL = \alpha r$$

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 F_1 F^2}{F_1^2 + F^2} + \frac{A_2 P_2 F_2 F^2}{F_1^2 + F^2} + A_3 P_3 F^2 \quad (10)$$

Onde:

$$A_1 = \frac{8.86 \times 10^{0.78 \cdot \text{pH} - 5}}{c}$$

$$P_1 = 1$$

$$F_1 = 2.8 \cdot \left(\frac{S}{35}\right)^{0.5} \cdot 10^{4 - \left(\frac{1245}{T+273}\right)}$$

$$c = 1412 + 3.2T + 1.19S + 0.0167Z$$

$$A_2 = 21.44 \cdot S \cdot (1 + 0.025T)/c$$

$$P_2 = 1 - (1.37 \cdot Z \cdot 10^{-4}) + (6.2 \cdot Z^2 \cdot 10^{-9})$$

$$F_2 = \frac{8.17 \cdot 10^8 \cdot \frac{1990}{T+273}}{1 + 0.0018 \cdot (S-35)}$$

Para  $T < 20$  °C:

$$A_3 = (4.937 \times 10^{-4}) - (2.59 \cdot T \times 10^{-5}) + (9.11 \cdot (T^2) \times 10^{-7}) - (6.5 \cdot (T^3) \times 10^{-8})$$

Para  $T > 20$  °C:

$$A_3 = (3.964 \times 10^{-4}) - (1.146 \cdot T \times 10^{-5}) + (1.45 \cdot (T^2) \times 10^{-7}) - (6.5 \cdot (T^3) \times 10^{-8})$$

$$P_3 = 1 - (3.83 \cdot Z \cdot 10^{-5}) + (4.9 \cdot (Z^2) \cdot 10^{-10})$$

Ao observar essas equações, pode ser identificado o aumento substancial da absorção com o aumento da frequência, razão pela qual as frequências elevadas não são utilizadas em

sonares de longo alcance. Quanto menor a frequência, menor a absorção, logo, o equipamento sonar que operar em mais baixas frequências conseqüentemente terá em um alcance maior.

### 2.4.3 – Espalhamento e Reverberação.

O espalhamento ocorre quando há o encontro da onda sonora com irregularidades nas regiões de fronteiras sejam elas no fundo, no volume da água ou na superfície do mar. Na superfície, o encontro da onda sonora com a fronteira água-ar gera componentes de reflexão coerentes e incoerentes. Quanto mais “lisa” estiver a superfície do mar mais próximo de a reflexão ser perfeita. A energia acústica incidente num mar rugoso também retornará completamente para a água. A diferença está na dispersão dessa energia, estando sob ação de espalhadores. Quanto maior agitação da superfície maior será o espalhamento. (19)

O chamado espalhamento de volume ocorre na extensão de água marinha e é causado por pequenos organismos vivos ou pequenas partículas em suspensão. De acordo com o coeficiente de espalhamento de Rayleigh, pode se dizer que quanto menores as áreas dessas partículas em relação ao comprimento de onda sonora maior será o coeficiente de espalhamento. Já o espalhamento de fundo é dependente das características do fundo do mar, como sedimentos ou pedras. (18)

Desta forma, a intensidade da dispersão varia não apenas com a localização, profundidade, frequência e estação do ano, mas também com o horário do dia. A variação diurna é causada pela migração vertical diária, um padrão de movimento que alguns organismos que vivem na zona próxima à superfície do oceano realizam todos os dias. Os organismos que apresentam esse padrão de comportamento variam em tamanho, desde o plâncton microscópico até organismos muito maiores, como peixes. A migração vertical diária é uma resposta a gradientes ecológicos, recursos, presas e predadores. No caso do fitoplâncton, embora a luz para a fotossíntese diminua exponencialmente a partir da superfície do oceano, a disponibilidade de nutrientes geralmente aumenta ao longo da coluna d'água. Conseqüentemente, alguns fitoplanctons migram para baixo na coluna d'água durante a noite para obter nutrientes, mas retornam à superfície durante o dia. Por outro lado, o zooplâncton e animais maiores geralmente não dependem da luz para o crescimento. No entanto, esses animais podem ser vulneráveis a predadores maiores que caçam pela visão em águas superficiais bem iluminadas, onde suas presas são mais abundantes. Como resultado, alguns desses animais

realizam o padrão oposto de migração vertical, subindo para a superfície durante a noite para se alimentar e descendo para profundidades mais seguras durante o dia. (18)

A reverberação é a soma das contribuições advindas do espalhamento da onda sonora. Assim como os espalhamentos podem ser divididos em de superfície, fundo e volume. Em alguns casos será o primeiro limitador de um sistema de sonar ativo, onde o sistema deverá fazer estimativas sobre quais condições de reverberação o sistema poderá ser utilizado. (9)

#### 2.4.4 – Reflexão

A reflexão é um dos resultados da componente coerente de uma interação de uma onda com uma fronteira plana e lisa. Sendo caracterizada pela energia que retorna ao meio de onde a fonte advém. (17)

Esse fenômeno é de suma importância para considerar-se em projeto de sonar, pois além da reflexão no alvo, há a reflexão em múltiplas fronteiras no oceano que restringem a propagação da energia sonora. (17)

O fenômeno da reflexão pode ser representado, através da Teoria dos Traçados de Raios. Desta forma, pode ser utilizada a Lei de Snell-Descartes, representada na equação 11 que estabelecerá a relação do ângulo incidente com a velocidade do raio sonoro: (17)

$$\frac{\sin\theta_1}{c_1} = \frac{\sin\theta_2}{c_2} \quad (11)$$

Desta forma, é possível observar que a reflexão perfeita ocorre quando o ângulo incidente é igual ao ângulo refletido. Quanto mais lisa a superfície refletora maior será a razão entre a reflexão e o espalhamento. A relação entre a reflexão e o espalhamento das ondas pode ser representado para efeito de cálculo, sendo a perda causada pela reflexão representada pela equação 12 como: (17)

$$TL_{\text{Refl}} = 10\log \frac{I_i}{I_r} = 20\log \left| \frac{P_i}{P_r} \right| = 20\log \frac{1}{|R|} \quad (12)$$

Onde R, representado pela equação 13, pode ser aproximado para:

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho_2 c_2 \sin\theta_i - \rho_1 c_1 \sin\theta_t}{\rho_2 c_2 \sin\theta_i + \rho_1 c_1 \sin\theta_t} \approx \frac{-\rho_1 c_1 \sin\theta_t}{\rho_1 c_1 \sin\theta_t} = -1 \quad (13)$$

#### 2.4.5 – Refração

Como o mar não possui características homogêneas e há diversas variações de grandezas físicas, definido fronteiras, a propagação da onda sonora ao longo de um perfil vertical sofrerá desvios chamados de refração. Para caracterizar esse fenômeno, se aplicará a Teoria dos Raios Acústicos ao fenômeno. Enquanto, a onda estratificada em raios, se utilizará a lei de Snell-Descartes para entender o comportamento. (20)

Como observado no item 2.3, o mar tem diversas camadas submarinas e o que provoca o encurvamento do feixe sonoro, esse encurvamento provocado pela variação de velocidade do som na água chama-se refração.

A base da Teoria dos Raios Acústicos sustenta que, ao longo das frentes de onda, a fase da onda ou a função temporal da solução permanece constante. O deslocamento da onda acústica, originada por um emissor sonoro, é representado por raios, de maneira análoga ao efeito observado na radiação eletromagnética. Isso pode ser representado através de diagramas de raios, o que facilita a compreensão da trajetória ao longo de um perfil submarino. (9)

Conforme descrito sobre o fenômeno de Espalhamento, essa representação apresenta resultados incongruentes quando há uma diferença brusca de pressão ao longo de um percurso igual ao comprimento de onda. Logo, essa teoria funcionará somente se não houver condições de Espalhamento acentuado, ou seja, quando não houver situações em que estejam presentes sinais de comprimentos de onda reduzido em relação às áreas das superfícies de partículas na sua trajetória. (9)

Como mencionado anteriormente, quando a aplicação da Teoria dos raios acústicos é possível, pode ser aplicada a lei de Snell-Descartes, que retorna o comportamento dos raios sonoros em um ambiente com velocidade variável, sofrendo desvios para regiões em que a velocidade de propagação do som é menor. (9)

Desta forma, a direção da onda acústica, terá um perfil ascendente quando ocorrer um gradiente positivo de temperatura e um perfil descendente de temperatura quando o gradiente

for negativo. Essa característica provoca diversos fenômenos de propagação das ondas acústicas que são de suma importância para previsão de alcance de um sonar. Essa situação é descrita nas figuras 4, 5 e 6 a seguir. (9)

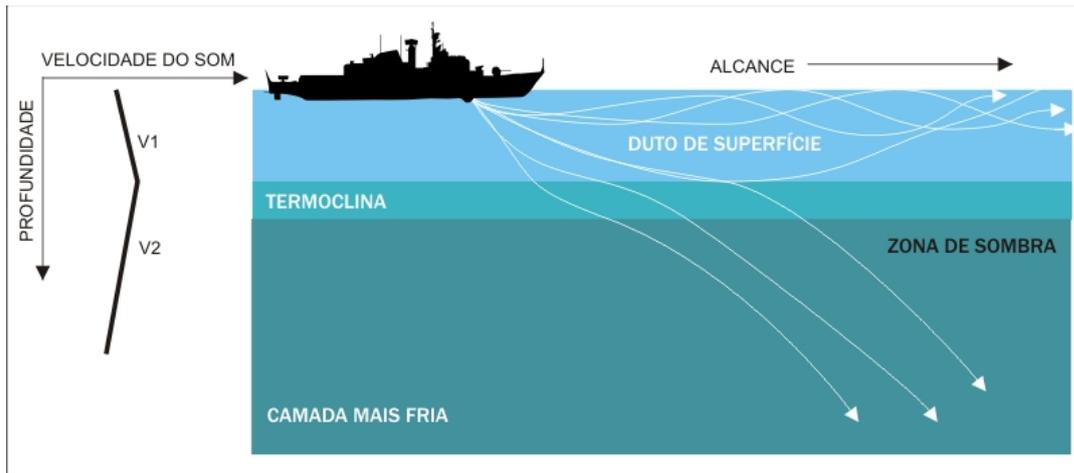


Figura 4 - Exemplo de Duto de Superfície. (8)

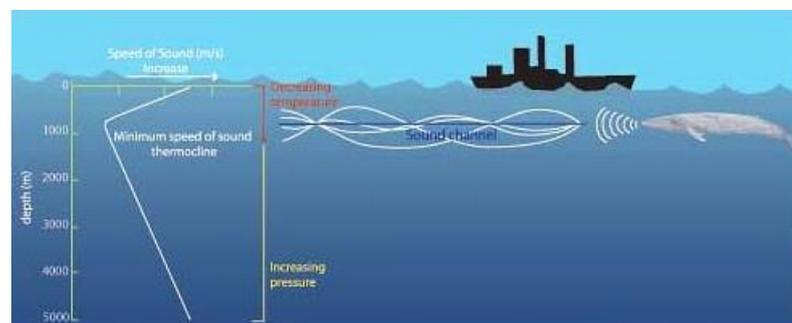


Figura 5 - Exemplo de Canal SOFAR. (21)

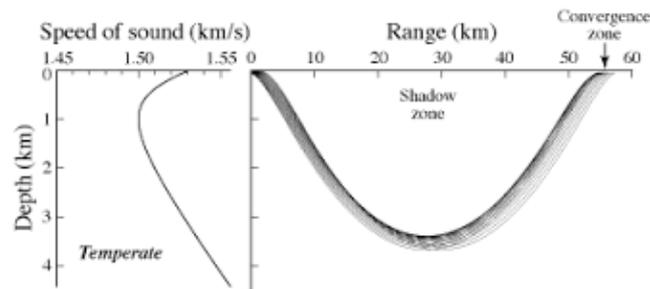


Figura 6 – Exemplo de Zona de Convergência. (22)

A figura 4 ilustra o fenômeno de Duto de Superfície, definido como um caminho em que a onda sonora fica confinada que permite a propagação do som a grandes distâncias próxima a superfície do mar. Isso acontece quando há uma formação de uma camada isotérmica de mistura próxima a superfície. Nesse caso, o raio sonoro vai em direção a termoclina, porém, dependendo do ângulo de incidência na região de fronteira esse raio se reflete em direção a superfície e na superfície reflete novamente em direção ao fundo. Essas múltiplas reflexões fazem com que esse duto seja formado como em um guia de ondas, possibilitando a propagação a longas distâncias. (9)

Na figura 5 é possível observar um canal SOFAR. Caracteriza-se por ser formado por refrações da onda sonora que tendem a se encurvar para região de temperatura mínima da água. Nessa região, a onda fica confinada entre fronteiras com nível de temperatura um pouco maior que a mínima. Nessa região, a onda sofre múltiplos processos de reflexão similares ao Duto de Superfície. (9)

Na figura 6 observa-se a formação de uma Zona de Convergência. Esse fenômeno decorre da propagação do som na água que inicialmente, na camada isotérmica, a velocidade do som cresce com o aumento da pressão. Na sequência, na termoclina, ela acompanha o decréscimo de temperatura acentuado o que faz com que a onda sonora encurve para o fundo. Ao chegar no mínimo de temperatura, nas zonas profundas, a velocidade do som acompanha o aumento de pressão, essa diferença de gradiente leva ao encurvamento para cima da onda sonora, gerando a zona de convergência. (9)

## 2.5 – Equações do Sonar

Como explicitado anteriormente, o objetivo de um Sistema Sonar é a detecção (ou não) de sinais sonoros de interesse. Para construir uma equação que detalhe o comportamento de um sonar é necessário considerar o ambiente em que está inserido. Tal fato dificulta a solução de detecção de um objeto abaixo da linha d'água. No caso do uso militar, a problemática é amplificada, pois tal objeto planeja manter-se oculto.

A equação sonar possui os seguintes parâmetros: relativos ao equipamento, ao alvo e ao caminho percorrido pela onda sonora. No próximo item serão detalhadas as Equações do Sonar Ativo e Passivo e serão detalhados os parâmetros ainda não explorados anteriormente. (9)

### 2.5.1 – Equação Sonar Ativo

Em um sistema sonar ativo, o transdutor tanto transmite quanto capta um sinal sonoro, o SL é medido em dB a uma distância de aproximadamente 1m de seu eixo central. As perdas de propagação definidas no tópico 2.4 assumem a variável TL, logo o nível acústico pode ser definido por (SL–TL). A TS é a parte do sinal que é refletido de volta para o receptor ou espalhado e a parte refletida acumula novas perdas no trajeto de volta. Ao longo desse processo, a EL no receptor é definida pela equação 14 como: (9)

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (14)$$

O eco do sinal de interesse está inserido em meio a diversos ruídos advindos do ambiente submarino (incluindo, efeitos advindos da atmosfera, ruídos de outras plataformas de superfície, sons provenientes da vida marinha), além da reverberação. (17)

O DI do receptor aumenta a relação sinal ruído. Na equação sonar, é expresso como um componente de redução do NL tanto do próprio equipamento quanto do ambiente acústico, culminando em uma potência relativa de ruído nos terminais do receptor igual a NL – DI, que pode ser denominado nível de ruído no feixe sonar. (17)

No transdutor, a SNR é a diferença entre o nível de eco e o nível de ruído nos terminais, sendo expressa como: (17)

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (15)$$

Quando o nível de eco for precisamente o bastante para que haja ocorrência da detecção, a SNR se igualará ao DT, podendo substituir tal termo na equação, como pode ser observado pela equação 16: (17)

$$DT = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (16)$$

Há situações em que a equação sonar estará limitada pelo ruído causado por reflexões incoerentes ao longo da trajetória da onda, a reverberação. Portanto, o termo do RL, presente na recepção do sinal, deve ser utilizado ao invés do nível de ruído (NL - DI). Nessas condições a Equação Sonar Ativo pode ser apresentado pela equação 17 como: (17)

$$DT = SL - 2TL + TS - RL \quad (17)$$

### 2.5.2 – Equação Sonar Passivo

Em Sistemas passivos, o alvo é o irradiador do sinal acústico a ser detectado. Desta forma, para efeito de cálculo, o NRI pelo alvo a uma distância de aproximadamente 1m, pode ser adotado como SL. Haja vista, não haver um eco do sinal, a onda se propaga somente uma vez na distância sonar-alvo, logo a perda por propagação total adotada será TL. Além disso, como o parâmetro TS é um termo que inclui a influência do alvo na atenuação e reflexão de um sinal acústico, é desconsiderado e a Equação do Sonar pode ser descrita na equação 18 como: (17)

$$DT = SL - TL - (NL - DI) \quad (18)$$

### 2.5.3 – Limiar de Detecção (DT)

O limiar de Detecção é definido como a razão entre a potência do Sinal no receptor de banda larga e o ruído medido no terminal do receptor. Desta forma, pode ser expresso matematicamente na equação 19 como: (9)

$$DT = 10 \log(P/N) \quad (19)$$

Quando o sinal está de fato presente no terminal de entrada do receptor, há duas formas de interpretar a situação: se realmente há a detecção (Probabilidade de detecção) ou se não há a detecção (Probabilidade de Falso alarme). Logo, pode-se dizer que o limiar de detecção, também, é uma variável dependente das duas probabilidades citadas acima.

Desta forma, o processo decisório requer a definição de um limite, que quando excedido significará que há um alvo presente. Dentro desse contexto, há o seguinte fator de ponderação: se o limite for baixo demais, a uma maior chance de o alarme soar mais vezes, gerando muitos falsos alarmes. Contudo, se o limite for muito elevado, há muito risco de não ser considerado uma detecção de um contato de interesse.

Conclui-se que o limite imposto será definido pela situação tática do momento, pois caso esteja em situação de paz e nenhuma previsão de elemento adverso nas proximidades pode se colocar o limite em um patamar acima. Entretanto, em uma situação beligerante, o limite deve ser mais baixo, pois não pode se aceitar o risco da não detecção.

#### 2.5.4 – Índice de Diretividade (DI)

O índice de diretividade é uma ferramenta essencial para descrever o padrão direcional de transdutores acústicos e sua aplicação em sistemas sonares é evidenciada pela equação sonar mencionada anteriormente. Conseqüentemente, ao conhecer o índice de diretividade de uma fonte, podemos extrair informações sobre a eficiência do sensor em direcionar a energia sonora para regiões específicas do espaço. Isso, por sua vez, possibilita uma previsão mais precisa do alcance sonar.

O índice de diretividade é uma medida que avalia a capacidade de um transdutor ou fonte sonora em concentrar energia em uma direção específica. Para fontes omnidirecionais em espaço livre, a intensidade acústica é uniformemente distribuída em todas as direções, resultando em uma diretividade de valor 1. No entanto, para fontes direcionais, a intensidade sonora é maior em sua direção principal em comparação com as demais direções. Essa discrepância é quantificada pelo índice de diretividade, que é matematicamente expresso como a razão entre a intensidade na direção do eixo acústico da fonte direcional e a intensidade da fonte omnidirecional. (23)

Desta forma o DI pode ser expresso como:

$$DI = 10\log D \geq 0 \text{ dB} \quad (20)$$

Contudo, o ganho expresso por DI na Equação 20 se torna complexo de se calcular porque depende do conhecimento das coerências do sinal e do ruído nas dimensões de um determinado arranjo. Como, esse estudo tem o propósito de definir o alcance sonar para um arranjo em linha, será utilizada a equação descrita por (24) na equação 21:

$$DI = 10 \log (2L/\lambda) \quad (21)$$

Já para um arranjo definido por um conjunto de linhas, pode ser descrito na equação 22 como:

$$DI = 3 + 10\log M_n + 20\log (f/f_0) \quad (22)$$

### 2.5.5 – Nível de Ruído Irrradiado (SL)

O ruído irradiado é gerado de forma similar ao ruído próprio, porém é medido em um hidrofone localizado fora da plataforma a uma certa distância no mar. O nível de furtividade de um navio é definido em termos da capacidade de controlar o nível de ruído irradiado. (23)

## 2.6 – Nível de Ruído (NL)

Nesse estudo, o ruído é definido como todo sinal acústico que não é um sinal que carrega informações de determinado alvo de interesse. No caso do ambiente marinho, há dois tipos de ruído existentes: Ruído próprio e o ruído ambiente (de fundo). (23)

### 2.6.1 – Ruído Próprio

O ruído próprio decorre da voltagem de ruído observada nos terminais de um hidrofone ou na saída de um conformador de feixes. Esse ruído é gerado não apenas pelo ambiente externo, mas também é proveniente de várias fontes internas do próprio sistema sonar. (23)

Dentre as fontes internas, incluem: hidrofones: utilizados no arranjo receptor do sonar podem gerar ruído devido a imperfeições em sua construção ou sensibilidade; circuitos eletrônicos interligados: conectam os hidrofones ao sistema sonar também podem contribuir

para a voltagem de ruído observada; vibrações mecânicas: causadas pelo casco e estruturas de suporte dos hidrofones podem induzir ruído no sistema; e emissão sonora do navio: A própria plataforma onde o sonar está instalado pode emitir sons que interferem com as medições. (23)

Dentre os ruídos de vibrações mecânicas mencionados, destaca-se o ruído hidrodinâmico resultante do fluxo de água nos hidrofones, em suas estruturas de suporte e no casco da plataforma do sonar. Esse ruído abrange diversas fontes, incluindo o ruído de fluxo, que consiste em variações de pressão na face dos hidrofones, provocadas pelo escoamento turbulento na camada limite em torno deles, a vibração induzida pelo fluxo no chapeado do casco, a cavitação e o ruído irradiado por vórtices de fluxo (23).

No tratamento do ruído próprio em um Arranjo de Sonar Rebocado, destacam-se as seguintes categorias: Ruído de Flutter ou Strumming, no qual hidrofones pendurados pelo cabo sofrem vibrações devido às correntes marinhas, gerando acelerações que resultam em ruído nos terminais dos hidrofones; Ruído triboelétrico, gerado pelos movimentos do cabo que causam fricção entre condutores e blindagem, produzindo cargas elétricas variáveis e resultando em ruído nos terminais dos hidrofones; Ruído de fluxo, presente em sonares rebocados devido ao ruído irradiado pelo navio rebocador que atinge o transdutor, além das vibrações no cabo de reboque e da camada limite adjacente ao transdutor; e Ruídos por flutuações de pressão, gerados em arranjos lineares rebocados por flutuações de pressão devido a movimentos verticais do arranjo e variações de pressão no óleo usado para preencher o tubo onde os sensores estão instalados, assim como por vórtices gerados no cabo de reboque (23).

Durante o desenvolvimento do projeto, caberá a esse estudo implantar técnicas ou módulos ao Arranjo elaborado a fim de reduzir o nível de ruído próprio gerado.

### 2.6.2 – Ruído Ambiente

O ruído ambiente ou de fundo decorre do ruído originado pelo efeito do ambiente marinho. Já que esse estudo considera um projeto de sonar para ser empregado em águas profundas, seguirá a seguir algumas características do ruído ambiente em função da faixa de frequência, de acordo com a tabela 1. (23)

Faixa de frequência	Tipo de Ruído
1 a 10Hz	Origem sísmica e hidrostática (ondas e marés) e turbulência oceânica.
20 a 500Hz	Origem de ruídos provenientes de embarcações, peixes e mamíferos marinhos.
500Hz a 5KHz	Origem proveniente de ruídos de cavitação de navios; ruído originário na superfície do mar (efeitos atmosféricos); peixes e mamíferos marinhos.
5 a 50KHz	Ruído originário na superfície do mar (efeitos atmosféricos); peixes e mamíferos marinhos; crustáceos.
Acima de 50KHz	Ruído originário de mamíferos marinhos e ruído decorrente da agitação térmica molecular no mar.

Tabela 1 – Ruído ambiente por faixa de frequência. (23)

Conforme o avanço tecnológico atual, a tendência é que os submarinos fiquem cada vez mais furtivos. Estes meios têm emitido sinais acústicos referentes ao seu maquinário, em frequências mais baixas, na faixa de menos de 1KHz. Como pode ser visto pela tabela acima, o mar possui muitos sinais acústicos provenientes das mais diversas faixas de frequências que podem mascarar o sinal de interesse. Posteriormente, durante a montagem do projeto, serão discutidas formas para reduzir o ruído ambiente e ampliar o sinal de interesse.

## 2.7 – Equipamentos Acústicos Submarinos

O objetivo de compreender a equação do sonar e os parâmetros que influenciam essa expressão reside em localizar e classificar um alvo específico de interesse. Portanto, para atingir essa meta, é essencial compreender o ambiente marinho em que se opera, a fim de antecipar as distorções presentes, assim como as características do próprio equipamento utilizado, incluindo seus níveis de ruído e sensibilidade.

Como a finalidade desse estudo baseia-se em elaborar um anteprojeto de sonar rebocado, adiante será avaliado como os componentes de um sonar padrão se comportam e o princípio de funcionamento deles.

### 2.7.1 – Transdutores

O objetivo do transdutor é examinar os processos nos quais um sinal elétrico, devidamente amplificado, é convertido em uma flutuação de pressão na água e vice-versa. Assim, efetua-se tanto a conversão de um impulso de energia elétrica para a pressão sonora que corresponde à transdução de um projetor ou transmissor acústico, quanto a conversão da pressão sonora para um impulso de energia correspondente à transdução de um hidrofone ou receptor acústico. (23,25)

Estes processos de conversão podem ser realizados por, pelo menos, três mecanismos distintos. A transdução piezoelétrica, magnetostrictiva e eletrostrictiva são responsáveis por tais transformações. Em um material piezoelétrico, a deformação se inverte quando há inversão do campo elétrico. Entretanto, nos materiais eletrostrictivos, a deformação compressiva é diretamente proporcional à magnitude do campo aplicado, e essa deformação não se reverte quando o campo também se reverte. Em ambos os materiais, a deformação de saturação é alcançada de forma similar. No entanto, nos materiais magnetostrictivos, a deformação de saturação é maior em comparação aos materiais piezoelétricos e eletrostrictivos. (23,25)

O efeito piezoelétrico é produzido porque as moléculas cerâmicas formadas exibem um momento dipolar. Cristais como o quartzo, que é piezoelétrico, são formados por moléculas que naturalmente possuem um momento dipolar. Os transdutores piezoelétricos baseiam-se na capacidade dessas cerâmicas de variarem suas dimensões quando sofrem uma diferença de potencial entre seus extremos. (25)

O efeito electrostrictivo funciona de forma semelhante ao piezoelétrico, porém com materiais como chumbo. A faixa de deformação efetiva é menor do que a de uma cerâmica piezoelétrica e um campo de polarização é necessário. As propriedades do material são mais dependentes da temperatura do que as cerâmicas piezoelétricas. (23,25)

O efeito magnetostrictivo baseiam-se nas propriedades de certos metais de variarem seu comprimento com a variação do campo magnético que os envolve. A velocidade do som em

materiais magnetostrictivos é menor do que das cerâmicas piezoelétricas, então os ressonadores podem ser significativamente reduzidos em tamanho. Os materiais magnetostrictivos são geralmente mais caros, em termos de volume, do que os materiais piezoelétricos. O acionamento magnetostrictivo geralmente pode operar em frequências da ordem de quilohertz. (23,25)

Dentre os três tipos de transdutores explicitados, o que mais possui aplicação para o objeto desse estudo é o piezoelétrico. Pois esses são menos custosos e possuem características de atuação que mais atendem ao projeto em questão.

### 2.7.2 – Hidrofonos

Os hidrofonos funcionam como receptores acústicos em ambientes subaquáticos. Esse equipamento detecta as variações de pressão de sinais acústicos e ruídos na água e produz uma tensão de saída proporcional à pressão. Além disso, eles geram uma tensão de ruído devido à agitação térmica em quaisquer resistências internas. (26)

Os hidrofonos geralmente são operados em uma ampla banda abaixo da ressonância. Os fatores que mais interessam são a tensão de saída de circuito aberto e relação sinal-ruído. O menor sinal detectável por um hidrofone é igual ou ligeiramente menor que o ruído ambiente do mar, a menos que o ruído próprio do hidrofone mais o ruído de entrada do pré-amplificador exceda o ruído do mar. (26)

Serão considerados dois tipos de princípios de funcionamento dos hidrofonos: pela sensibilidade à pressão e ao gradiente de pressão(velocidade). Os hidrofonos sensíveis à pressão são os mais comuns; eles são normalmente operados abaixo da ressonância, onde sua resposta é independente da frequência e omnidirecional. Os hidrofonos sensíveis à velocidade têm um feixe em forma de oito padrão com um aumento de 6 dB por oitava em resposta com o aumento da frequência. (26)

As características mais relevantes para construção de hidrofonos geralmente são: alta sensibilidade, baixo ruído próprio, baixa distorção e sensibilidade uniforme em toda a faixa de frequência de interesse. Em geral, a sensibilidade depende da frequência, da direção da onda plana incidente, da

propriedades do material ativo, como cerâmica piezoelétrica, e a geometria de o hidrofone. (26)

Se o hidrofone for usado para determinados níveis de som, sua sensibilidade deve ser determinada periodicamente, preferencialmente em função do espectro de frequência a ser utilizada. (26)

Normalmente, os hidrofones têm um componente direcionalidade e são sensíveis a uma faixa larga de frequências. Em frequências mais baixas, quando o hidrofone é menor que o comprimento de onda, ele se torna omnidirecional. Logo, próximo às frequências ressonantes ocorre alguma direcionalidade. (26)

Para os hidrofones serem mais eficientes é necessário possuir um bom desempenho de ruído, que geralmente, é aumentando ao se inserir um pré-amplificador associado. Contudo, ao lidar com ambientes silenciosos, com um ruído ambiente baixo é necessário que se reduza o ruído próprio da plataforma.

Para redução do ruído próprio, é necessário utilizar os hidrofones longe do navio associado, utilizando o sensor em maiores profundidades. Contudo em águas rasas, isso deve se haver uma cautela maior devido as interferências por reflexão no fundo. Outro fator importante é a necessidade que o pré-amplificador fique próximo ao hidrofone para reduzir o efeito de cabo, pois, longos comprimentos de cabo e alta impedância hidrofones tendem a aumentar o nível de ruído eletrônico.

Os hidrofones circulares, cilíndricos e esféricos são os mais comuns. Utilizados por causa de sua alta sensibilidade, resposta suave de banda larga até e possivelmente por ressonância, impedância geralmente baixa, boa pressão hidrostática capacidade e simplicidade. Hidrofones cilíndricos precisam de tampas para manter o ar suporte e encapsulamento para evitar vazamento de água enquanto hidrofones esféricos precisa apenas de encapsulamento. (26)

Os hidrofones planares são normalmente usados nos arranjos de sonares passivos. Em ativo, arranjos em que o projetor também é usado como hidrofone, o transdutor geralmente é projetado como um projetor para atingir o nível máximo da fonte e a resposta do hidrofone

resultante geralmente é considerada adequada na banda ativa. No entanto, pode não ser satisfatório se usado como um arranjo passivo fora da banda ativa. Os hidrofones podem ser operados abaixo da ressonância proporcionando menos variação de fase e amplitude de um para outro na banda ativa, e a quantidade de material cerâmico piezoelétrico necessária pode ser muito menor do que para os projetores. Além disso, um arranjo de recepção separado pode ser projetado para reduzir o ruído de forma mais eficaz do que pode ser feito em um arranjo de projetores. Finalmente, a capacidade de banda larga de um arranjo de recepção separado também o torna útil para operação de busca passiva. (26)

### 2.7.3 – Arranjos (*Arrays*)

A sensibilidade de um sonar pode ser melhorada quando vários hidrofones são projetados obedecendo um espaçamento previsto pelo Teorema da Amostragem. Quando as dimensões do arranjo são de tamanho suficiente, os atrasos sucessivos de sinais acústicos na chegada em vários hidrofones possibilita uma estimativa da localização da fonte sonora. (10)

Como observado acima, os diversos hidrofones possuem variadas geometrias que garantem o sucesso em diferentes tipos de emprego. De forma análoga, há arranjos com configurações espaciais distintas, dentre elas destacam-se: lineares (unidimensionais); planares (bidimensionais); e volumétricas (tridimensionais). (27)

#### 2.7.3.1 – Arranjo Linear

Os arranjos lineares são formados por um conjunto de transdutores em linha reta. O arranjo apresentado na figura 7 ilustra um arranjo com um número  $N$  de hidrofones com espaçamento uniforme de  $r$ . O sinal do hidrofone de número  $N$  sofre ação de um multiplicador, e em seguida é gerado um atraso no valor de  $n\tau$ . Ao final desse processo, todos os sinais são somados gerando uma saída  $y(t)$ . (28)

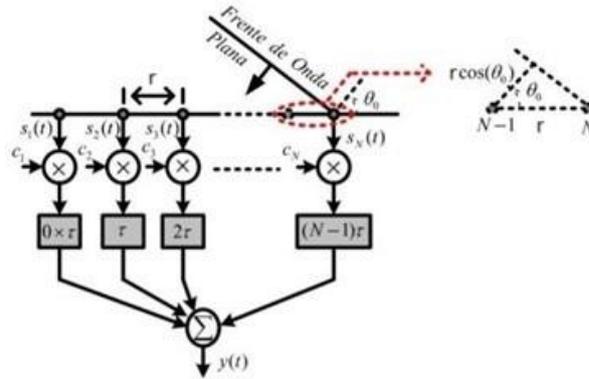


Figura 7 – Exemplo de arranjo linear. (27)

Na figura 7, é possível observar um sinal acústico advindo de uma onda plana, incidindo no arranjo com um ângulo  $\theta_0$ . A frente de onda emite sobre o hidrofone N e gera o  $s_n(t)$ . Por conseguinte, reproduz o mesmo processo para todos os hidrofones até chegar no hidrofone 1. Após atingir o hidrofone N, a frente de onda deve percorrer uma distância ( $r\cos\theta_0$ ) antes de atingir o próximo hidrofone. Desta forma, o  $s_{n-1}(t)$  será uma versão retardada de  $s_n(t)$ . (28)

Para que o sistema funcione de forma desejável, pretende-se que a saída do somador seja a de maior valor possível. Deste modo, necessita-se que os retardos provenientes da direção de propagação sejam compensados, realizando o somatório deles em fase, explicando, assim, o propósito dos retardadores. Como ilustrado na figura 7, o sinal do hidrofone 1 é o mais retardado pela propagação e não sofre retardo adicional no conformador de feixes. Já os demais sensores são submetidos a um retardo adicional para que todos os sinais processados pelos hidrofones cheguem em fase na entrada do somador. (28)

Caso, essa frente de onda venha de uma direção diferente daquela para a qual o conformador está projetado ( $\theta_0$ ), os atrasos introduzidos pelo conformador não serão apropriados para alinhar em fase os sinais captados pelos hidrofones. Como resultado, a amplitude do sinal de saída será reduzida. O sinal de saída do conformador pode ser expresso pela equação 23 e 24 como: (28)

$$y(t) = \sum_{n=1}^N c_n s_n(t - (n - 1)\tau) \quad (23)$$

Sendo  $\tau$ :

$$\tau = \frac{r \cos(\theta_0)}{c} \quad (24)$$

A partir desta expressão pode-se verificar, quando os coeficientes  $c_n$  são iguais, que a amplitude do  $y(t)$  varia com o ângulo de incidência da onda plana (marcação da fonte sonora)  $\theta$  de acordo com a equação 25:

$$|H(\theta)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\pi r}{\lambda} \left(\cos \theta - \frac{c\tau}{r}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi r}{\lambda} \left(\cos \theta - \frac{c\tau}{r}\right)\right)} \right| \quad (25)$$

Que pode ser escrito pela equação 26 como:

$$DI = \frac{\sin\left(\frac{KW \sin(\phi)}{2}\right)}{\frac{KW \sin(\phi)}{2}} \quad (26)$$

Como pode ser observado pela equação acima se o sinal vier de uma marcação polar em direção ao arranjo ele será recebido da mesma forma. Na fase do projeto do *array* serão discutidas formas de eliminar essa ambiguidade.

### 2.7.3.2 – Arranjos Bidimensionais

Os hidrofones são dispostos em uma única superfície plana, formando uma matriz bidimensional. Podendo ser divididos em planares e circulares.

Os Arranjos planares de hidrofones possuem a forma plana e podem determinar a direção de chegada dos sinais vindos na direção da normal ao plano. Desta forma, habilita a identificação dos ângulos de azimute e de elevação. (29)

O uso militar dos arranjos planares no ambiente subaquático tem maior aplicação em submarinos, quando instalados junto ao costado dessa plataforma, permitindo estimação da direção de chegada de sinais acústicos que estejam no mesmo plano horizontal da plataforma. (24) Logo, esse arranjo não será utilizado para compor o projeto nesse estudo.

As disposições circulares de elementos com simetria radial, frequentemente chamadas de arranjos em anel, diferem dos arranjos lineares ou planares. No caso dos arranjos circulares, o padrão de irradiação não é divisível e as contribuições do aliasing espacial não se manifestam como lóbulos de grade discretos no padrão de irradiação.

A excitação co-fásica envolve equalizar as fases das contribuições de todos os elementos quando o arranjo recebe ou transmite sinais em uma direção angular específica. Enquanto nos planares ou lineares os elementos são co-faseados com a aplicação controlada de um corte de fase linear para determinar o ângulo de varredura do feixe de radiação, em circulares, isso se estende diretamente do conceito de faseamento de arranjo linear. Para matrizes circulares, a equalização de atraso temporal real dos sinais dos elementos é usada para garantir a operação de banda larga. No entanto, o desempenho de lobos laterais requer tanto corte de amplitude quanto de fase no arranjo co-faseado, e a varredura de um feixe além de uma deflexão limitada requer a comutação do setor excitado. A largura do feixe circular co-atrasado é dependente da frequência, mas oferece a vantagem de cobertura de  $360^\circ$  com pouca deformação do feixe. (30)

Embora os arranjos circulares tenham várias vantagens em certos contextos, como cobertura de 360 graus e simetria radial, para um projeto de sonar rebocado essa estrutura é menos eficiente, tendo em vista fatores como: maior complexidade mecânica, dificuldade maior de estabilização diante da manobra da embarcação rebocadora e menor componente de direcionalidade.

### **2.7.3.3 – Arranjos Volumétricos**

Os Arranjos volumétricos dividem-se entre cilíndricos e esféricos. Os cilíndricos são normalmente empregados em sonares ativos de casco e em alguns modelos de sonares passivos.

O princípio de funcionamento desses arranjos é similar ao linear, com introdução de um elemento de retardo no sinal a fim de produzir um componente de direcionalidade. (23)

A composição do arranjo é montada com elementos transdutores compondo uma superfície externa cilíndrica. Os elementos em uma mesma vertical formam um *stave* (pilha), que são conectados entre si em paralelo. Desta forma, é possível considerar cada *stave* como um arranjo linear vertical que proporciona uma direcionalidade no plano vertical. Para formar um feixe de direção horizontal são combinados sinais de diversos *staves*. (23)

Os arranjos esféricos têm como composição uma disposição tridimensional de hidrofones ao redor de um ponto central, formando uma estrutura semelhante a uma esfera. Esse conjunto permite uma detecção omnidirecional de sons em todas as direções. Isso é útil para monitorar sons provenientes de várias fontes em diferentes ângulos ao redor do sensor. Contudo, apresenta como desvantagens uma complexidade maior de montagem, maior dificuldade de gerar um fator de direcionalidade eficiente, ou seja, acompanhar um alvo em direção específica. (24) Esse modelo geométrico pode ser usado para monitoramento do ambiente acústico, porém não atende ao propósito estabelecido nesse estudo.

## **2.8 – Aplicações de Sistemas Acústicos**

Neste estudo, dentre os Sistemas acústicos existentes, serão explicitados os sistemas nos quais a Marinha do Brasil tem capacidade de empregar na Guerra Antissubmarino e em adição, o Sistema de Sonar Rebocado a ser projetado.

### **2.8.1 – Sonoboias**

As Sonoboias possuem o mesmo princípio de funcionamento de um sonar comum, contudo são descartáveis. Normalmente, esses equipamentos são lançados através de aeronaves tanto de asas fixas quanto de asas rotativas. (31)

As boias mais modernas são compostas de dois módulos, sendo um acústico e outro eletrônico. O primeiro é utilizado para a detecção em si, constituído por transdutores de banda estreita com maior capacidade de detecção de sinais acústicos de menores intensidades. O segundo, opera como um sistema de rádio, utilizando o ar como meio de propagação, enviando

informações para a plataforma lançadora. Um exemplo de sonoboia moderna é descrito por (32), conforme pode ser observado na figura 8.

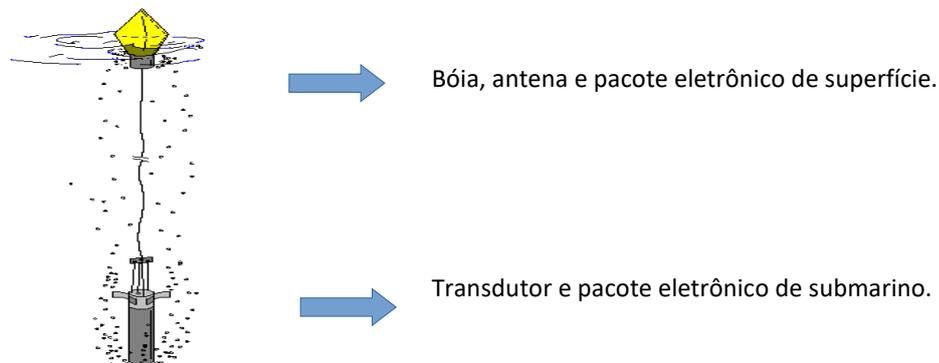


Figura 8 – Exemplo de Sonoboia. (32)

Na figura acima, podem ser observados ambos os módulos anteriormente citados, separados por um cabo que possui a função de colocar o transdutor em profundidade maior a fim de diminuir os efeitos dos ruídos da superfície.

### 2.8.2 – Sonar de Casco

Os sonares de casco são comumente empregados em navios de superfície. Esses equipamentos caracterizam-se por possuírem arranjos cilíndricos montados sob a quilha ou a proa do navio, sendo na proa do navio mais indicado, pois apresenta menor nível de ruído próprio. (24)

A faixa de operação desses sensores vai de 3KHz para tons de banda estreita, até valores próximos de 15KHz para banda larga. Como possui a característica possuir maior largura de banda e capacidade de fazer uma varredura ampla, contudo apresenta um DI pequeno para baixas frequências (menor que 1KHz). Como eles estão anexados às plataformas, o nível de ruído próprio é bastante elevado devido ao ruído de propulsão e demais maquinários do navio. Desta forma, conclui-se que o sensor será ineficaz para encontrar submarinos mais modernos submersos a grandes profundidades. A distância de detecção aproximada pode ser descrita na faixa de 5Km a 20Km, contudo o é bastante dependente das propriedades físicas do oceano. (24)

Embora o sensor possua limitações, não deve ser desconsiderado o seu uso para guerra antissubmarino, em particular, para detecção e neutralização de torpedos. Por característica, a

principal arma dos submarinos emite sinais acústicos de frequência e intensidade elevada. Desta forma, o sonar de casco consegue detectar e com integração adequada possibilita acionar medidas antitorpédicas suficientes para neutralizar a ameaça. (24)

### 2.8.3 – Sonar de Profundidade Variável (VDS)

O VDS surge como solução a limitação do sonar de casco frente ao ruído próprio do meio e ao perfil descendente do som na água. Esse sensor consiste em um sonar preso a um cabo de reboque mergulhado a certa profundidade a fim de evitar a zona de sombra do sonar de casco. (24)

Contudo, o VDS ainda possui não possui soluções de detecção relacionado a faixa de frequência e de diretividade em relação ao sonar de casco. E ainda tem de buscar soluções para se contrapor ao ruído de fluxo e estabilização de posição dinâmica gerado pelo cabo de reboque. (24)

### 2.8.4 – Arranjo de Sonar Rebocado (Towed Array Sonar)

Ao considerar a utilização do TAS para o emprego em navios de superfície operando em ASW, deve ser observado o desafio trazido por um ambiente submarino ruidoso. Para uma detecção de um sinal nessas condições, faz-se necessário, que se capte informações de muitos comprimentos de onda de um sinal de interesse. (33) A partir dessa premissa, os sonares de casco ou os VDS podem atuar como sensores auxiliares na ASW. Contudo, esses sensores, dificilmente, conseguem captar um sinal de uma plataforma submersa moderna em uma distância suficientemente longa para se contrapor a tal ameaça. Desta forma, afirma-se que o uso de TAS é primordial para ASW.

Os TAS passivos surgem primeiro no cenário OTAN, pois diante da Guerra Fria era necessário a detecção de submarinos nucleares soviéticos. Esses sensores, geralmente eram demasiadamente longos (mais de 1km) conseguiam detectar submarinos hostis em águas profundas a longas distâncias. (33)

Um TAS é uma coleção de hidrofones dispostos em uma linha em uma longa mangueira flexível ligada à plataforma associada por meio de um cabo de conexão. A mangueira é geralmente preenchida com óleo para ter fluotabilidade neutra, ao mesmo tempo que protege a

eletrônica da água do mar condutora. O sinal de pressão recebido pelos hidrofones o convertem em um sinal elétrico. Os sinais são transmitidos de volta à plataforma rebocadora e processados pelo conformador de feixes e o padrão de feixe é formado. (33,34)

Quando operando em modo passivo, as funções básicas desse tipo de sonar são: melhorar a relação sinal-ruído através de discriminação espacial contra ruídos; e determinar a direção de chegada dos raios sonoros. (35)

Um arranjo de sonar rebocado é composto por elementos que captam o sinal de todas as direções. Ao utilizar técnicas de conformação de feixes obtém-se maior seletividade, ampliando o sinal advindo de uma determinada direção e rejeitando de outras direções. Desta forma, pode ser dizer que o arranjo atua como um filtro direcional. Além da direção, um arranjo tem uma resposta diferente para cada frequência que a ele chega.

Portanto, é possível afirmar que o Arranjo de Sonar Rebocado foi concebido para reduzir as seguintes desvantagens em comparação com o sonar ativo montado no casco: superar a zona de sombra formada pela termoclina; contornar a limitação do ruído próprio elevado do navio rebocador; e enfrentar os desafios de obter informações sobre sinais de frequências mais baixas. (33,36)

O ATAS é constituído de um emissor ativo funcionando em conjunto com um arranjo de hidrofones em linha. O desenvolvimento deste tipo de sensor deve-se ao surgimento de submarinos diesel-elétricos muito silenciosos operando em águas rasas próximo a costa. O ATAS funciona com um arranjo de hidrofones menor. A faixa ideal para detectar um submarino ativamente é ligeiramente superior à faixa de frequência usada para detecção passiva, permitindo uma redução do tamanho da matriz rebocada para algumas dezenas de metros. Essa redução se mostra essencial ao lidar com um conflito em águas rasas, permitindo maior manobrabilidade do meio de superfície e maior capacidade de detecção tendo em vista que, em menores profundidades, a velocidade do som sofre mais efeitos de fundo-superfície como: chuva, geadas e demais efeitos atmosféricos, inviabilizando a detecção de forma passiva. (33)

Embora o ATAS seja uma solução relevante para a solução de conflitos no mar atualmente, há conjunturas as quais ainda se faz necessário um arranjo passivo mais longo. Quando em operação em áreas profundas ou ainda quando o meio de superfície pretende operar de forma mais furtiva e ainda a depender do tipo de ameaça esperada é necessário alterar o

modo de operação para o passivo. Desta forma, é importante desenvolver o TAS, logo esse será o objeto desse estudo.

### **3 – FRAGATAS CLASSE TAMANDARÉ**

Como o Programa está produzindo navios que possuem diversos sensores e equipamentos e trará diversos benefícios para o Brasil, será abordado como funcionará o Programa de forma geral e após isso a relação do Programa com a ASW.

Dessa forma, esse capítulo estará dividido nos seguintes tópicos:

- Conceitos Gerais;
- Construção e Composição;
- Relação com a Guerra Antissubmarino; e
- Limitações físicas para o anteprojeto.

#### **3.1 – Conceitos Gerais**

A proposta selecionada para construção das FCT foi a de um projeto de Navio de Propriedade intelectual da empresa alemã TKMS, baseado nos navios da Classe *Meko A100*, sob tutela do Consórcio Águas Azuis. (3)

A entrega dessas belonaves ao setor operativo está prevista entre os anos de 2025-29. Desta forma, esse programa garante, que na próxima década, a MB terá um alto poder de combate para proteger e patrulhar a Amazônia Azul, assegurando a soberania brasileira no mar. Além de ampliar a capacidade atual de realizar operações de busca e salvamento. (3)

Dentro deste programa, é possível destacar o impulso à Indústria Nacional de Defesa, com um foco particular na MB. Nesse ínterim, salienta-se o acordo de Transferência de Tecnologia em questão, juntamente com o Programa de Gestão do Ciclo de Vida. Ambos esses componentes visam alcançar uma nacionalização de mais de quarenta por cento a partir da entrega da segunda fragata da classe. Além disso, oferece suporte gerencial desde a concepção até a aposentadoria dos meios navais. A nacionalização dos equipamentos destinados a sensores e armamentos bélicos representa uma maneira crucial de assegurar a soberania operacional, e, ao mesmo tempo, proporcionar vantagens logísticas substanciais. (3,37)

A transferência de tecnologias descrita no programa objetiva a participação de empresas brasileiras no desenvolvimento e integração do CMS e do IPMS. Desta forma, garantiria ao Brasil não somente a capacidade de construir e produzir belonaves estruturalmente, mas também avançaria na construção de Sistemas Integrados. Logo, a limitação da nacionalização restringe-se aos sensores e armamentos empregados. Este cenário reafirma a importância de desenvolver projetos que suplantem tal deficiência. (38)

### **3.2 – Construção e Composição**

O processo de construção das Fragatas está sendo realizado de forma inovadora para a indústria naval nacional. O projeto inclui uma construção através do modelo de *Paperless* baseando-se em um alto nível de digitalização de desenhos estruturais, contribuindo para uma maior segurança em relação a informações sigilosas e para um projeto mais sustentável de montagem. Aliado a isso, o conceito do programa baseia-se em uma construção por estruturas modulares, que acelera o tempo de construção e mitiga riscos na integração dos sistemas. (39)

Como indicado na seção 3.1 a FCT está sendo construída com base no projeto da Classe *Meko A100*. Contudo, há adaptações para que os navios não sejam do porte de uma corveta, mas também sejam menores que uma Fragata, caracterizando-se como uma Fragata Leve. A tabela 2 ilustra a situação com as características gerais do navio.

Dados Técnicos	Valores
Comprimento	107,2 metros
Boca	15,95 metros
Deslocamento	3,5 mil toneladas
Capacidade máxima	136 tripulantes.
Aeronave embarcada	1
Veículo não tripulado	1

Tabela 2 - Dados Característicos da FCT. (40)

A figura 9 ilustra a como será a Fragata Classe Tamandaré depois de construída.



Figura 9 – Modelo ilustrativo da Fragata Tamandaré. (39)

Pelo descrito pela tabela acima, as FCT possuem características gerais que atendem a missão de renovar a frota brasileira de forma a contribuir para o cumprimento das atribuições constitucionais da MB. Contudo, para efetuar uma análise mais profunda é necessário verificar quais são as capacidades de sensores e armamentos a serem utilizados. O esquema dos sensores e armamentos das fragatas podem ser explicitados pela figura 10.



Figura 10 – Esquema de Sensores e Armamento das FCT. (41)

Esse estudo não tem o intuito de detalhar cada sensor e armamento. Entretanto, pode-se afirmar que este conjunto traz um avanço tecnológico em relação a capacidade bélica dos navios escolta atuais, destacando o radar de busca aérea *Hensoldt 4D*, que possui um alcance de detecção instrumental de 250 km e é o primeiro com tecnologia 4D empregado na Força.

Adicionalmente ao conjunto de sensores e armamentos, os navios da classe *Meko 100A* possuem uma área adicional de mais de 250 metros quadrados de área, capaz de instalar até 5 containers modulares de 39 metros cúbicos de volume (6,1 m de comprimento; 2,44 m de largura; e 2,59 m de altura) além de um bote de 11 m. A possibilidade de acrescentar os módulos de missão aumenta a versatilidade dos navios, permitindo que qualquer fragata se adapte a

missões específicas, podendo substituir os módulos conforme necessário. Essa possibilidade configura que não é preciso possuir módulos para todas as fragatas, podendo se utilizar somente o necessário para cada a missão. Além disso, esse modelo permite a compra ou desenvolvimento de algum módulo específico para se contrapor a uma ameaça diversa, aumentando a sua adaptabilidade. (42)

### **3.3 – Relação com a Guerra Antissubmarino**

Ao observar as capacidades das futuras fragatas brasileiras, nota-se que para o combate a meios submersos, temos como único sensor o sonar de casco ATLAS Elektronik ASO 713 e possui uma plataforma de lançamento de torpedo SEA TLS-TT. Como o foco do estudo está voltado para capacidade de detecção, a plataforma de lançamento e o torpedo adquirido não serão analisados com mais detalhe.

Ao comparar o futuro modelo de sonar com o sonar de casco EDO 997C, modernizados com o SONAT empregados nas FCN, preliminarmente, é possível observar um avanço na capacidade de Guerra Antissubmarino principalmente em capacidade de acompanhamento de alvos simultâneos e em classificação de contatos. Contudo, ao analisar que os dois são sonares de casco e possuem as mesmas limitações de detecção previstas no tópico 2.8.2, afirma-se que esse avanço é tímido em relação a capacidade de alcance e discriminação de direção de chegada do sensor.

Embora, o projeto inicial das FCT não preveja nenhum outro sensor atrelado a ASW, os navios da classe *Meko 100A* possibilitam a instalação de módulos através de containers. Dessa forma, as novas fragatas brasileiras reafirmam a versatilidade de combate em todos os ambientes de guerra. Tendo em vista, que, posteriormente, é possível adquirir ou desenvolver sensores como TAS ou ACTAS, o que representaria um salto na capacidade de combate na ASW de mais de cinquenta anos.

### **3.4 – Limitações físicas para o anteprojeto.**

Como visto anteriormente na seção 3.1, com o Programa de Construção das FCT, o país sinaliza evolução tecnológica na área de construção naval. Contudo, apresenta lacunas em relação a capacidade de nacionalização de tecnologias referentes a sensores e armamentos. A

seção 3.3 pontuou que em termos de ASW ainda falta ao país desenvolver sensores que ampliem a possibilidade de detecção de alvos submarinos a maiores alcances.

Como solução a essa problemática, apresenta-se a proposta de um anteprojeto de TAS. Entretanto, um projeto deste porte necessita estar alinhado com as capacidades operacionais da MB. Logo, surge, então, a necessidade de verificar as limitações físicas para o projeto antes de desenvolvê-lo. De acordo com a situação disposta, há de se dispor de um sensor que seja compatível com as futuras plataformas de superfície.

Adicionalmente, cabe o destaque que países que operam com classes *Meko* já utilizam com TAS através dos módulos de missão. A própria fabricante desenvolve esse tipo de sensor com esse propósito. Tendo em vista esse cenário, a ideia é desenvolver o anteprojeto com dimensões similares ao fabricante descrito, limitadas pelas dimensões concebidas na seção 3.2.

A Atlas Elektronik não disponibiliza o elemento de reboque e de uma mangueira de hidrofones em uma configuração padrão de sonar rebocado. Contudo, ainda de acordo com a fabricante é possível haver uma solução de dois containers contendo um o TAS de acordo com o exemplo da figura 11. (43)



Figura 11 – TAS em container. (43)

Pela imagem, pode ser observado que o cabrestante tem mais metade da altura do container. Ao aproximar de forma conservadora pode ser considerado o diâmetro de 1,2 metro, logo o comprimento da circunferência do cabrestante igual a aproximadamente 7 metros. Como por essa figura, poderia ser dado pelo menos mais uma volta no diâmetro do cabrestante. Logo, será considerado como restrição máxima de comprimento da mangueira de hidrofones igual a 35 metros.

#### 4 – ANTEPROJETO DE SONAR REBOCADO

Para projetar esse sensor, o projeto está dividido em:

- Composição geral;
- Mecânica;
- Eletrônica;
- Processamento Digital de Sinais;
- Avaliação de Eficácia do Arranjo.

##### 4.1 – Composição geral.

A configuração padrão do Arranjo de Sonar Rebocado a ser utilizada nesse estudo pode ser demonstrada pela figura 12:

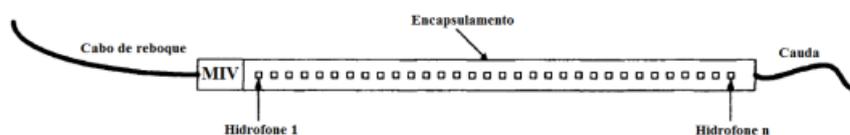


Figura 12 – Modelo de Arranjo. (44)

O detalhamento de cada um dos componentes será mais estudado nas seções adiantes. Por ora, serão estabelecidos os seguintes requisitos:

#### 4.1.1 – Frequência ótima e espaçamento de hidrofones

Para esse protótipo, será considerada a faixa de frequência de 100 a 800 Hz. Pois como observado na seção 2.8.4 os submarinos evoluem cada vez mais na capacidade de se manterem furtivos. Contudo, as faixas mais baixas de frequências – faixas de maquinário, por exemplo - são mais difíceis de suprimir e viajam a maiores distâncias com menor atenuação no mar.

Ao observar experimentos sobre perfil de propagação sonora no mar, pode ser visto que sinais de frequências mais próximas a 100 a 800 Hz são captadas a distâncias maiores. Adicionalmente, os sons mais perceptíveis de submarinos mais silenciosos são os produzidos pelas máquinas auxiliares e principais. Logo, a frequência possivelmente ótima para essa seção é de 500 Hz. (45)

Para medir o espaçamento dos hidrofones de um arranjo linear de sonar rebocado tem de se respeitar o teorema espectral da amostragem espacial a fim de não haver erros de *Aliasing*. Esse teorema estabelece que o espaçamento adequado entre hidrofones deve ser de metade do comprimento de onda do arranjo. Dessa forma, o espaçamento pode ser descrito pelo seguinte cálculo representado pela equação 27:

$$c = \lambda f \quad (27)$$

Considerando  $c = 1500$  m/s e  $f = 500$ Hz, tem-se que o comprimento de onda será igual a 3 metros e conseqüentemente o espaçamento dos hidrofones em linha será de 1,5 metros.

#### 4.1.2 – Dispositivo de eliminação de ambigüidade esquerda-direita e número de hidrofones.

De acordo com o discutido na seção 2.7.3, os arranjos lineares possuem uma ambigüidade polar, ou seja, não é possível saber se o sinal está vindo da esquerda ou da direita do arranjo.

Para neutralizar esse efeito, já houve diversas pesquisas sobre o assunto. Como resultado, podem ser utilizadas as seguintes técnicas: utilizar um *triplet array*; utilizar dois arranjos lineares em paralelo; de alterar o rumo da embarcação com o intuito de obter ângulos relativos a uma nova direção do navio, permitindo realizar uma comparação entre os ângulos; e considerar que o arranjo nunca estará perfeitamente reto. (34,44,46,47,48)

O terceiro método citado é muito relevante quando se têm arranjos pequenos e não se possui restrição de manobra (44). Contudo, como o estudo tem o intuito de desenvolver um projeto para MB não é conveniente se limitar arranjos muito pequenos, ou ainda, em situações beligerantes, talvez seja necessário manter um rumo durante um período maior. O quarto método envolve maior complexidade de implementação e modelagem e tem mais uso em submarinos. (34)

As duas primeiras técnicas são as mais vistas na literatura. Os estudos (46,48) são trabalhos atuais que abordam as limitações e vantagens de cada técnica individualmente. Já, o (47), se destaca na tentativa de comparar os dois métodos. Na figura 13, é possível observar uma ilustração da configuração de cada um deles:

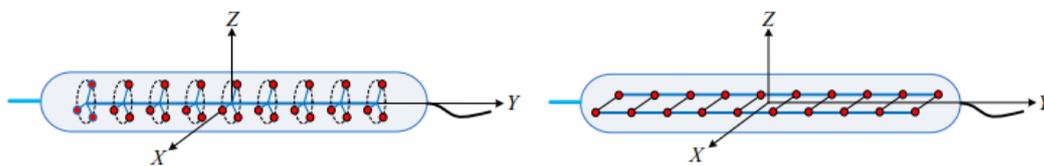


Figura 13 – Esquema de um *triplet* de sensores e de dois arranjos lineares em paralelo. (47)

De acordo com a literatura citada acima, pode se descrever as seguintes vantagens do *triplet* de sensores: A resolução angular mais precisa, devido ao padrão de feixe de cardioide, garantindo o lóbulo principal proeminente em dos bordos; alto desempenho em frequências elevadas, principalmente acima de 600 Hz; Limites de direcionamento de feixe definidos: possui um limite de direcionamento de ângulo de elevação bem definido de  $45^\circ$ , o que facilita sua operação em um intervalo de frequência específico (600 a 1000 Hz). Já os dois arranjos lineares em paralelo: mais fácil implementação; flexibilidade em diferentes frequências; precisão na estimativa do ângulo do alvo. (47)

Como a flexibilidade em frequência e a utilização dos sensores para captar as frequências mais baixas são peças primordiais para esse estudo, decide-se utilizar para este protótipo os dois arranjos lineares em paralelo.

O método escolhido é capaz de discriminar entre bombordo e boreste ao ajustar a fase dos campos de sinal recebidos nas duas linhas de forma a aumentar a potência do sinal proveniente de um lado, enquanto suprime o sinal indesejado do outro lado. (48)

Para a construção do projeto, ainda é preciso calcular a largura  $D$  explicitada na figura 14. Contudo, como a largura do lóbulo principal do padrão de feixe varia com a frequência e o espaçamento dos elementos. Para otimizar a diretividade do arranjo, a razão entre o comprimento de onda mínimo e o comprimento de onda da frequência de operação deve ser mantida próxima a 1. No entanto, à medida que a frequência diminui, essa razão diminui, resultando em uma ampliação do lóbulo principal do feixe. Portanto, encontrar uma configuração de espaçamento que funcione bem em uma ampla faixa de frequência é um desafio. (47)

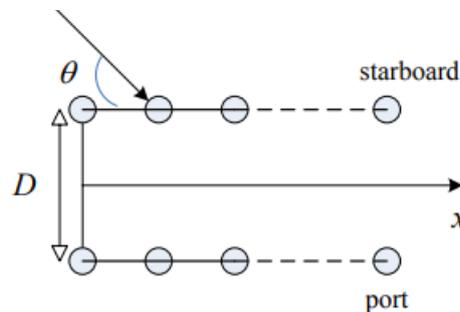


Figura 14 – Arranjo linear ampliado. (48)

Para resolver essa situação, (47) propõe a criação de diversos *sub-arrays*, em que cada um deles vai obedecer a um espaçamento específico dependente da frequência em que se quer captar, o que aumentaria o tamanho e complexidade do projeto. Logo, será calculado  $D$  para a frequência ótima do dispositivo, e posteriormente, será analisada a capacidade de distinguir a ambiguidade do sistema criado para os limites da faixa de frequência. O cálculo para  $D$  é simplesmente o comprimento de onda dividido por 4, logo  $D = 0,75$  metros.

Logo, o número total de hidrofones está restrito ao critério proposto na seção 3.4, com um arranjo com o tamanho máximo de 35 metros. Como a distância de separação no eixo  $x$  dos

hidrofonos é de 1,5 metros, poderia se ter até 22 hidrofonos em cada arranjo, para efeito deste protótipo serão utilizados 21 hidrofonos em cada arranjo horizontal, totalizando 42.

## **4.2 – Mecânica.**

Esta seção é composta de projeto de cada item mecânico, se subdividindo em:

- Cabo de Reboque;
- Cauda;
- Módulo Interno de Vibrações (VIM);
- Diâmetro do Arranjo; e
- Materiais e montagem do Arranjo.

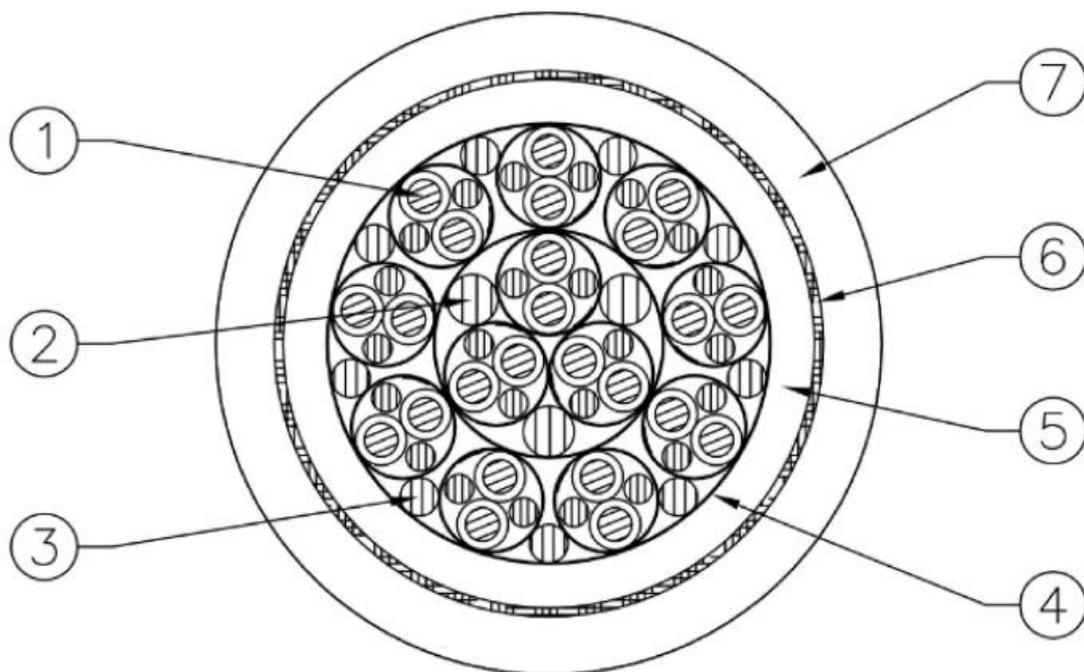
### **4.2.1 – Cabo de Reboque.**

O cabo de reboque tem a função de conectar a plataforma rebocadora ao arranjo. O comprimento do cabo de reboque influencia os seguintes fatores: quanto maior o cabo, mais complexo é dirimir o nível de ruído de fluxo produzido pelo arrasto, maior será o esforço no cabrestante e mais difícil de estabilizar o conjunto na horizontal em uma profundidade almejada; quanto menor o cabo, maior o nível de ruído próprio oriundo da cavitação, demais máquinas da embarcação e proveniente da hidrodinâmica em contato com o casco do navio. (44)

Tendo em vista as vantagens e desvantagens de aumentar ou diminuir o cabo, se o cabo for muito curto, o conjunto atuará nas proximidades da superfície e todo o arranjo estará limitado pelo ruído da cavitação do navio rebocador e não conseguirá captar sons de submarinos que atuam abaixo da termoclina. Desta forma, é importante que o conjunto esteja atuando em profundidade ao menos próximas a da termoclina, ou do alvo. Em razão do exposto, o comprimento do cabo deve ser maior e os ruídos advindos desse comprimento de cabo devem ser atenuados por outros componentes da estrutura como VIM.

Ao verificar a literatura nacional sobre os projetos de sonar rebocado, foi verificado que foram feitos projetos de arranjo de sonar rebocado para uma profundidade de operação de até 50 metros (35,44). Contudo, ao deparar-se com modelos prontos ou protótipos de trabalhos internacionais se entende como uma profundidade média de operação em mais de 50 metros com mais 100 m de cabo. (49,50)

Para esse estudo, será estabelecido utilizar um cabo de reboque de 100 metros. Como base para construção, será utilizado o modelo de (51), que apesar de inicialmente projetado para uma estrutura de somente oito elementos, tem o propósito de estabelecer parâmetros para construção de dispositivo de 160 elementos. A composição interna deste tipo de cabo pode ser descrita na figura 15 abaixo:



Legenda	
Número	Material
1	12 pares trançados 0,75 mm <sup>2</sup> com isolamento de polietileno de alta densidade
2	Enchimento de PVC com 1,8 mm de diâmetro.
3	Enchimento de PVC com 1,4 mm de diâmetro.
4	Fita de poliéster
5	Bainha de base de Poliuretano de alta dureza, com espessura radial de 1,5 mm.

6	Trança de fibra com carga máxima de ruptura de 587 quilos.
7	Bainha de poliuretano com espessura de 2mm

Figura 15 – Corte Transversal do Cabo de Reboque de diâmetro externo de 22.8 mm. (51)

#### 4.2.2 – Cauda

A cauda ou corda de arrasto é o último componente que é conectado à extremidade de popa do conjunto. Como pôde ser observado na seção 4.1.2, é primordial para a detecção que o conjunto do arranjo permaneça estável na horizontal durante a operação. Portanto, a corda de arrasto é adicionada para aumentar a força de arrasto e alinhar o conjunto. (52)

Ao longo do movimento do reboque as vibrações dessa cauda produzem ruídos incoerentes que podem ser captados pelo hidrofone, e por esse motivo, deve-se adicionar um VIM de popa. Desta forma, a configuração do projeto é adaptada conforme descrito na figura 16.



Figura 16 – Modelo do Arranjo do Experimento. (52)

Diante do observado em (44,51) uma cauda de 50 metros é suficiente para manter o conjunto estabilizado com a horizontal. Essa cauda é constituída por um cabo de tração simples de 8 mm de espessura.

O módulo não acústico descrito pela figura 16 não contém nenhum sensor e está associado a seção de hidrofones. (52)

### 4.2.3 – VIM

O VIM à frente está localizado logo após o cabo de reboque. A vibração e o ruído de estrumação provenientes do cabo de reboque são absorvidos por esta seção. Da mesma forma, a função do VIM traseiro é atenuar a vibração devido à ação semelhante a um chicote da cauda. Geralmente, as propriedades físicas de ambos os VIMs são semelhantes à seção do hidrofone. A composição do VIM se baseia em três componentes principais: o cabo flexível, o espaçador e a mangueira flexível. Cada um desempenha um papel específico na proteção do conjunto. (52,53)

A mangueira mantém os componentes juntos e protege de fatores externos, sendo preenchida por líquido de fluabilidade neutra. As partes de terminação são fixadas em cada extremidade para preservar o fluido interno dentro da mangueira e fornecer uma interface de conexão. Em caso de tensão excessiva, os elementos de resistência, que se estendem de uma extremidade à outra, evitam danos ao VIM. Espaçadores rígidos são inseridos com espaçamento no VIM para aumentar a rigidez à flexão nas condições operacionais desejadas. Eles também protegem os cabos de energia e dados quando ocorre flexão excessiva. (52) Um exemplo de VIM pode ser observado na figura 17:



Figura 17 – Modelo de VIM. (52)

O cabo elástico, feito de material que diminui de tamanho quando esticado, atua como elemento primário de suporte de carga e dissipa energia de vibração. Sua capacidade de esticar funciona como um amortecedor de choque, reduzindo a transmissão de energia de vibração ao longo do cabo de reboque. Para esse protótipo será utilizado uma trança de nylon de 8 milímetros. (53)

O cabo rígido, projetado para suportar a carga em caso de falha do cabo elástico, conecta o cabo de reboque ao *array* rebocado. Para esse protótipo, o material escolhido é a fibra trançada de aramida de Kevlar por garantir resistência à ruptura que excede as tensões previstas, evitando a perda do objeto rebocado. (53)

O espaçador é montado no cabo elástico e está em contato com a parede interna da mangueira externa. Para o protótipo, o material a ser utilizado é PVC. Sua função é transmitir a energia de vibração do cabo flexível para a mangueira externa, dissipando-a, além de guiar os cabos rígidos e elétricos, mantendo-os na posição correta. Montado flexivelmente, o espaçador minimiza pontos de alta tensão. (53)

A mangueira externa, flexível e elástica, envolve o espaçador, o cabo elástico e os cabos rígidos na direção longitudinal. O material utilizado é o poliuretano, com a espessura da parede de 2,2 mm, selecionada para proporcionar atenuação de vibração desejada. Este dispositivo é preenchido por óleo de rícino, fluido de preenchimento de fluabilidade, garantindo a integridade do VIM durante operações de reboque. O protótipo a ser utilizado nesse estudo segue o modelo utilizado no Anexo A. (53)

#### 4.2.4 – Diâmetro do arranjo.

Conforme abordado nas seções 4.2.2 e 4.2.3, é essencial destacar que o aumento no arrasto do dispositivo resulta em uma amplificação das vibrações, acarretando, um incremento no nível de ruído. Essa relação direta entre a força de arrasto e o diâmetro do dispositivo merece atenção especial, visto que um diâmetro reduzido se traduz em uma diminuição proporcional na força de arrasto e, conseqüentemente, na emissão de ruído. (44)

Adicionalmente, o tamanho do arranjo desempenha um papel crucial, influenciando não apenas a força de arrasto, mas também o peso total. Nesse contexto, torna-se evidente que arranjos mais compactos se associam a uma redução significativa no peso do conjunto. Essa redução de peso não apenas otimiza a eficiência, mas também amplia consideravelmente a versatilidade do conjunto, especialmente quando projetado para ser rebocado por embarcações de menor porte. (44)

Entretanto, o diâmetro desse projeto necessita ter dimensões grandes o suficiente para caberem os dois arranjos lineares, cabeamento eletrônico e pré-amplificadores associados. O diâmetro dos arranjos comerciais varia de 40 a 80 mm. Para este protótipo será utilizado um arranjo de 60 mm. Desta forma, atende-se o requisito de caber todo o arranjo e manter o nível de ruído próprio mais baixo.

#### 4.2.5 – Materiais e montagem do Arranjo.

Inicialmente, cabe ao estudo abordar o processo para a seleção de materiais, sendo imprescindível estabelecer requisitos iniciais para desenvolver um protótipo. Este protótipo visa possuir características como facilidade de reparo de componentes, baixo impacto ambiental, resistência dos componentes, isolamento mecânico eficaz para redução de ruídos e estanqueidade dos equipamentos internos. (44,51)

Como consequência do que foi visto na seção 2.4.4, a refletividade do som aumenta com a diferença de impedância acústica entre meios. Portanto, na construção do arranjo, é crucial que os materiais associados aos hidrofones apresentem impedância acústica próxima à da água do mar (44). Logo, abaixo estarão listados os materiais a serem utilizados no protótipo e como se dá o processo de montagem do dispositivo.

O encapsulamento e impermeabilização do arranjo são elementos essenciais para assegurar o desempenho confiável no ambiente submarino. A seção acústica do conjunto é alojada em tubo de PVC com espessura de 6 mm. O uso de óleo de rícino como fluido de compensação e acoplamento de pressão é estratégico, pois não reage quimicamente com os componentes do conjunto e não possui elementos tóxicos ou poluentes (44,51).

Os adaptadores, feitos de aço inoxidável, desempenham um papel essencial, proporcionando vedação final e conectividade ao VIM. Os componentes são fixados a um cabo de aço e fixados no local. Para o isolamento mecânico dos hidrofones, são empregadas montagens de TPU de baixa densidade, que amortecem vibrações e fontes de ruído do reboque. Cada hidrofone é equipado com uma montagem em TPU de baixa densidade, fixando-o no lugar por meio de travas de cobre zincadas, conforme pode ser visualizado na figura 18. (51)

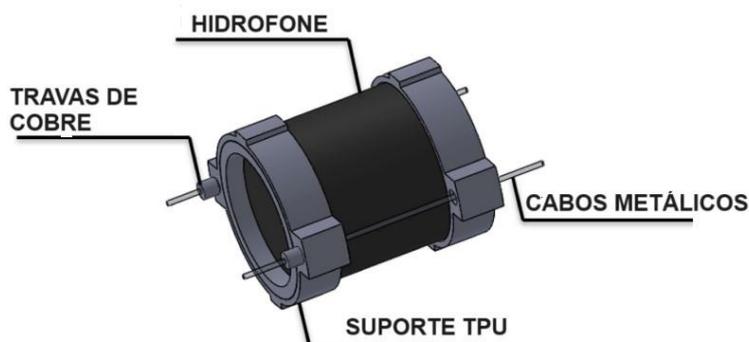


Figura 18 – Montagem do Hidrofone. (51)

A espuma de poliuretano (PUF) de 10 poros por polegada é estrategicamente utilizada para espalhar ondas respiratórias e amortecer o contato dos fios, proporcionando redução significativa de ruído. Além disso, o PUF protege contra ondas respiratórias que podem causar bolhas de ar e ondas extensionais que viajam pelo tubo de PVC (51). O esquema dessa espuma no dispositivo é caracterizado pela figura 19.

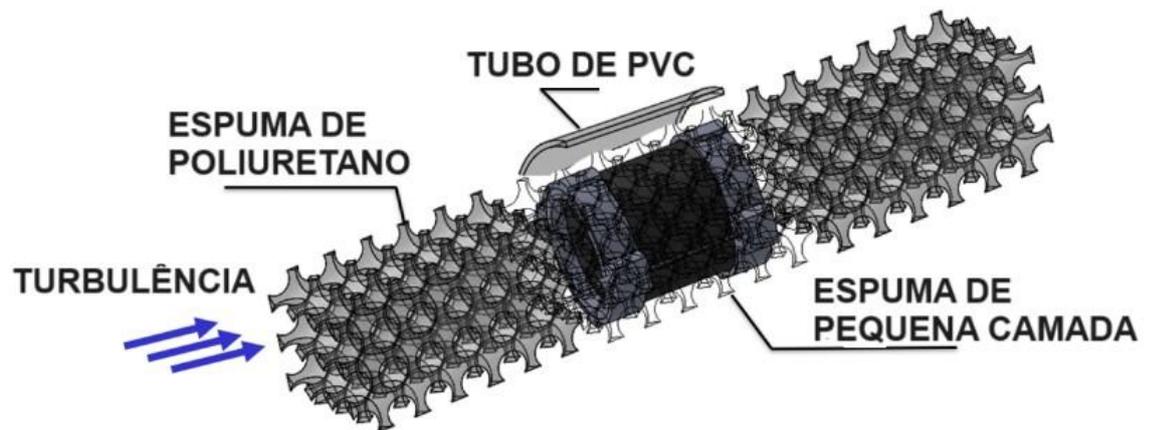


Figura 19 - Esquema da Espuma de Poliuretano. (51)

Um cilindro de aço inoxidável foi usinado para adaptar um conector Teledyne MHDO e a tubulação de PVC. Um tampão de enchimento/ventilação foi adicionado para aumentar a velocidade de enchimento/drenagem da matriz. Na figura 20 pode ser visto com detalhe esse adaptador.

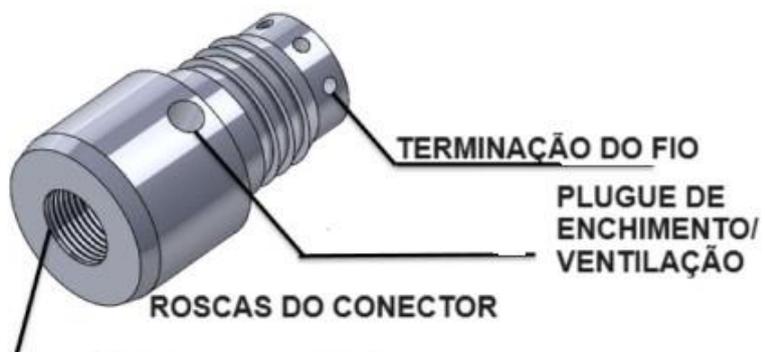


Figura 20 – Adaptador. (51)

O adaptador MHDO é cortado com precisão para permitir uma superfície de vedação na face do adaptador e o raio interno é útil para viabilizar uma vedação de anel de vedação dupla. O esquema de um conector MHDO está presente no Anexo B. O tampão de ventilação/enchimento é uma conexão de tubo inoxidável de alta pressão com fita de politetrafluoroetileno (PTFE) para gás/óleo. Seis furos uniformemente espaçados com roscas são usados para acomodar pontos de terminação para o elemento de resistência Vectran. Apenas dois dos seis furos são usados e o restante fornece acesso às ferramentas. O produto pode ser observado na figura 21.



Figura 21 – Adaptador MHDO. (51)

A fixação da tubulação é realizada com braçadeiras plásticas termo retráteis e de vedação ampla, proporcionando uma vedação forte e resistente a temperaturas variáveis. O adaptador da cauda é rosqueado para uma conexão de tubo de aço inoxidável de alta pressão que tem o centro rosqueado para uma rosca com um parafuso de olhal para conectar o VIM. As roscas do parafuso de olhal são revestidas com um adesivo trava-roscas, que é projetado para travamento e vedação permanente de fixadores de rosca, mas ainda pode ser removido com aplicação direta de calor. Esse adaptador pode ser ilustrado pela figura 22.



Figura 22- Adaptador e olhal para o VIM. (51)

### 4.3 – Eletrônica

A parte eletrônica presente no projeto está interessada na recepção do sinal pelo dispositivo submerso. Nela, está contida, o sistema eletrônico de aquisição dos sinais e os sistemas responsáveis por enviar as informações coletadas para o processamento de sinais realizado por um *software*. O esquema das configurações eletrônicas do projeto está contido no Apêndice A.

Dessa forma, essa seção vai se subdividir nos componentes eletrônicos responsáveis pela recepção do sinal, estando foi subdividida em:

- Hidrofonos;
- Pré-amplificadores;
- Cabos elétricos; e
- Placa de áudio.

#### 4.3.1 – Hidrofonos.

Há diversos modelos de hidrofonos que poderiam ser utilizados nesse projeto. Para projetar esse arranjo optou-se por escolher hidrofonos omnidirecionais que trabalhem na faixa de frequência e profundidades especificadas nas seções 4.1 e 4.2. Segundo relato do

Encarregado da Divisão de Equipamentos Acústicos Submarinos do IPqM, Sr. Orlando J.R. Afonso, os hidrofones BII-7140 da *Benthowave* atenderiam ao objetivo dessa pesquisa.

A figura 23 e a tabela 4 ilustram o hidrofone a ser utilizado e suas especificações técnicas.



Figura 23 – Hidrofone BII 7141. (54)

Especificações Técnicas	Dados
Sensibilidade	$202 \pm 2$ dB V/ $\mu$ Pa
Faixa de Frequência de Operação	0,1Hz-120Khz
Profundidade Máxima	300
Direcionalidade	Omnidirecional
Fios	AWG 26.
Tamanho total	12,6mmx32mm

Tabela 3 – Especificações técnicas do hidrofone. (54)

#### 4.3.2 – Pré-Amplificadores.

A utilização de pré-amplificadores é essencial para sustentar uma boa relação sinal-ruído. Para processar adequadamente o sinal, é vital ampliá-lo antes que percorra todo o trajeto, desde o hidrofone até o navio rebocador do dispositivo.

Como critério para seleção desses componentes, foi utilizado o mesmo fabricante dos hidrofones, já que esses modelos geram ganhos de sinal de forma satisfatória. Essa escolha possibilita, caso o projeto seja testado mais adiante, uma customização do produto com mais confiança. Dentre as opções da verificadas na *Benthowave*, o modelo escolhido foi o BII1041. Na tabela 4.3 é possível observar as especificações técnicas dos pré-amplificadores.

Especificações Técnicas	Dados
Corrente	9mA
Amplificação	40dB
Banda de Frequência	6Hz a 8MHz
Bateria de alimentação	12V

Tabela 4 – Especificações Técnicas dos Pré-Amplificadores. (55)

### 4.3.3 – Cabos Elétricos.

A escolha do tipo de cabo elétrico a ser utilizado no protótipo é baseada em capacidade de resistência a pressão e compatibilidade com o conjunto pré-amplificador-hidrofone. Nesse sentido, foi verificado nas especificações do fabricante do hidrofone e do amplificador, que a bitola de cabo previsto para operação é o 36 AWG, que também contribui para redução da densidade da fiação. (54,55) Cada fio de saída é um par trançado 36 AWG de etileno-tetrafluoretileno (ETFE). O ETFE é ligeiramente mais forte em resistência à ruptura do que o politetrafluoroetileno (PTFE), o que permite um isolamento de fio mais fino e mais forte. Todos os fios analógicos dentro do arranjo mantêm uma distância de separação entre a fiação digital e de alimentação para reduzir o ruído. (51,54,55)

### 4.3.4 – Placa de Aquisição do Sinal.

A seleção da placa de aquisição do sinal é baseada em torno dos requisitos atendidos em trabalhos anteriores, especialmente em (44). Além do mais a placa é fácil de encontrar no mercado nacional e possui baixo custo. A placa escolhida é ilustrada na figura 24.



Figura 24 – Placa de Aquisição de Áudio TASCAM US800. (56)

A placa em questão opera com uma frequência de amostragem de 96KHz, prevenindo possíveis erros de *aliasing* no sinal. Ela dispõe de 8 entradas e 6 saídas para conectores de áudio, permitindo uma amplificação máxima de 44dB. O cabo de alimentação da placa de áudio inclui um adaptador com entrada para tensões de 110V/220V, resultando em uma saída de 5V com 2A. (44)

#### 4.4 – Processamento Digital de Sinais

A partir do momento do anteprojeto realizado nas seções 4.1, 4.2 e 4.3. Cabe ainda como objetivo de o estudo avaliar o protótipo. Para tal, serão analisados os diagramas de irradiação e as previsões de alcance do sensor. Para desenvolver essas fórmulas a fim de gerar gráficos consistentes tem de se produzir um modelo de processamento de sinais adequado.

O processamento de sinais só será realizado quando o dado adquirido pelos sensores for convertido para digital. Esse processo de conversão é realizado pela placa de áudio. Após isso, a placa de áudio passará os sinais digitalizados para um computador que por meio de software processará o sinal para efetivamente encontrar a direção de chegada, distância e demais características do sinal.

A técnica de Processamento de Sinais que será usada nos diagramas será a de conformação de feixes (*beamforming*). Essa técnica tem por objetivo receber sinais dos diversos hidrofones e através de processos que gerem de interferências construtivas que permitam gerar mais energia na direção de chegada do sinal e rejeição das demais. A técnica de processamento a ser utilizada nesse estudo será a *delay-and-sum* em que o funcionamento foi explicitado pela seção 3.7.3.1.

Para a previsão do alcance sonar desejado não houve necessidade de aplicação de técnicas de processamento. O método utilizado será descrito mais detalhadamente adiante.

## **4.5 – Avaliação de Eficácia do Arranjo.**

Essa seção será subdividida em Diagramas de irradiação para verificar a resposta angular que o arranjo possui e a previsão de alcance do sonar sob condições pré-estabelecidas.

### **4.5.1 – Diagrama de Irradiação.**

O Diagrama de Irradiação é uma ferramenta fundamental para avaliar a eficácia de um arranjo em diferentes ângulos de chegada. Ele pode ser interpretado como uma representação gráfica do índice de diretividade do arranjo. Por meio dessa análise, é possível compreender como o desempenho do arranjo varia em resposta a diferentes direções de chegada de sinais.

A análise dos ganhos do arranjo foi conduzida utilizando a fórmula do Índice de Diretividade, conforme descrito nas equações: 20 e 26. Diferentes números de elementos e valores de frequência do sinal de chegada foram considerados durante essa análise. Os ganhos resultantes foram comparados para três ângulos distintos de chegada de ondas planas: 0°, 45° e 90°, sendo esses ângulos referentes ao eixo perpendicular ao eixo do arranjo. Os gráficos resultantes foram gerados por meio de código Python, cuja implementação está detalhada no Anexo C. Para as ilustrações gráficas nessa seção, a título de comparação sempre serão mostrados os gráficos com um número de hidrofones igual a 11, 21 e 33, ou seja, comparar os resultados do protótipo com número de hidrofones acima e abaixo do conjunto. Os gráficos 1 a 5 ilustram um gráfico de índice de diretividade com Ângulo de chegada 000 ° e considerando uma única linha do *array*. Os gráficos 6 e 7 estarão com o ângulo de chegada de 030 ° e 060 ° respectivamente também com uma única linha do *array*.

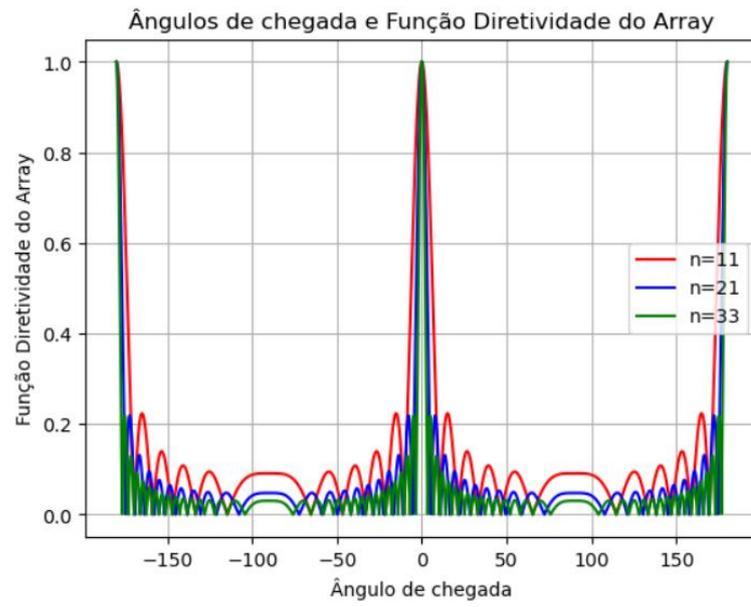
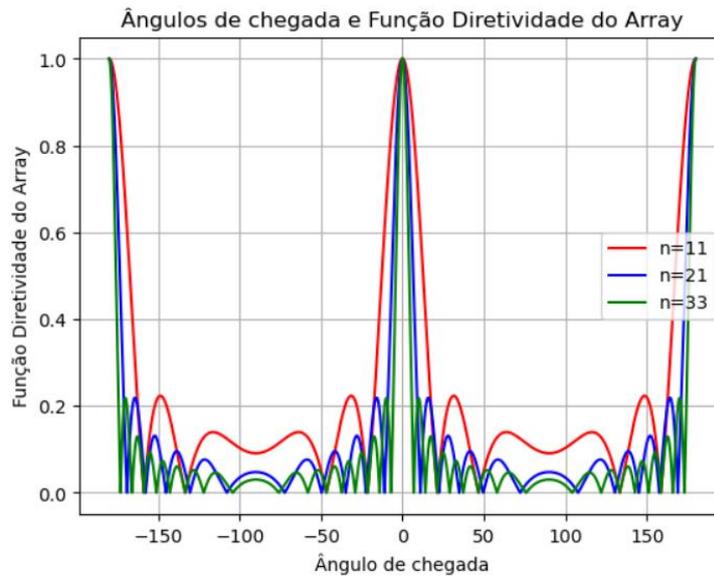
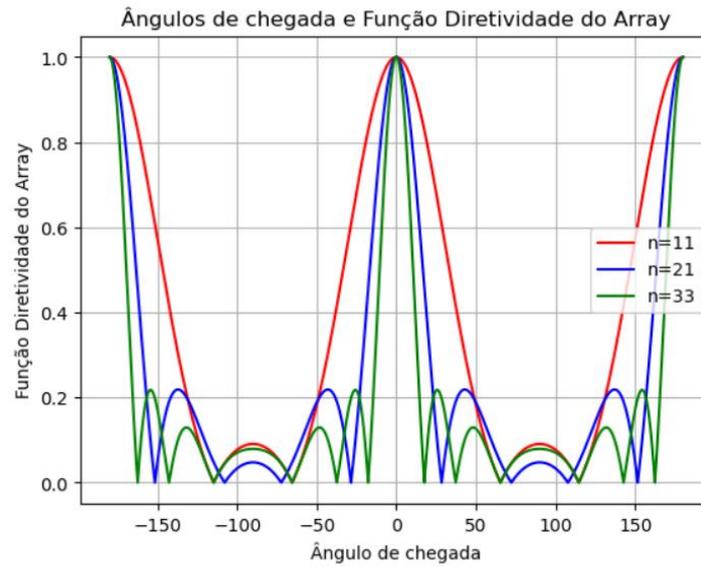


Gráfico 1 – Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de Array para sinal com frequência de 500 Hz.



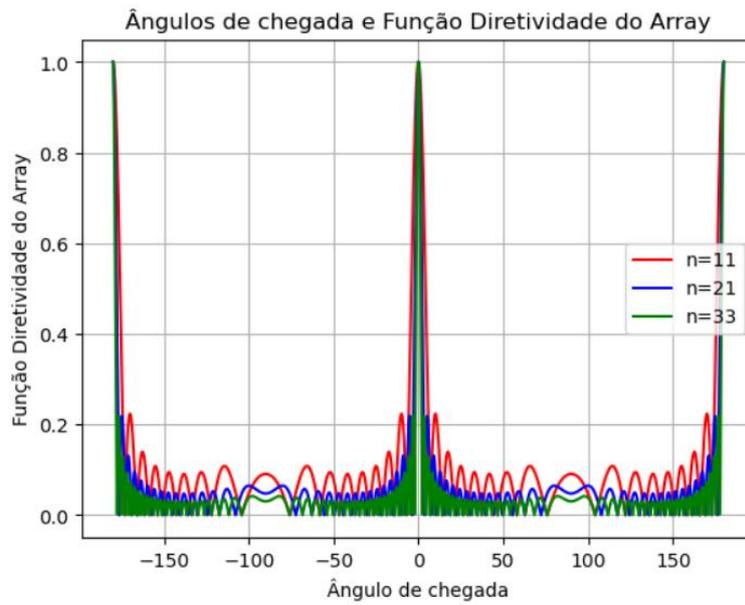


Gráfico 4 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de *Array* para sinal com frequência de 750 Hz.

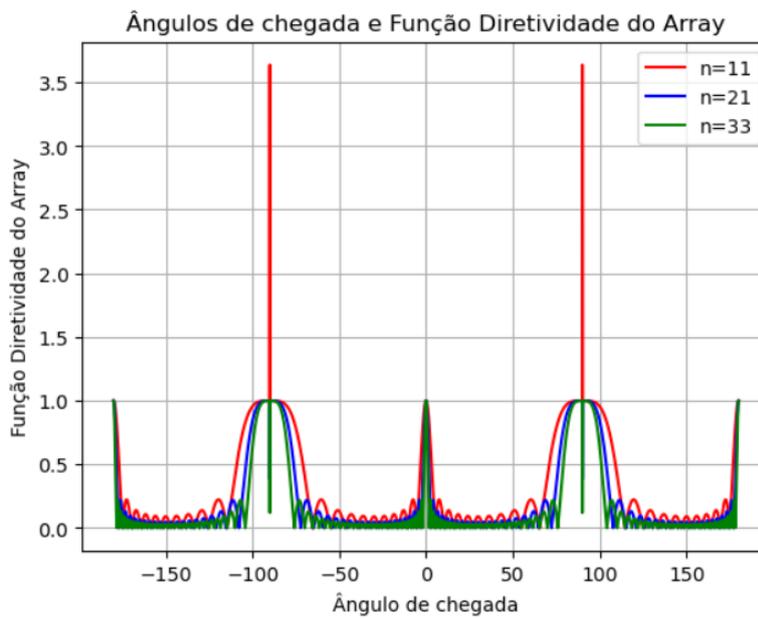


Gráfico 5 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de *Array* para sinal com frequência de 1000 Hz.

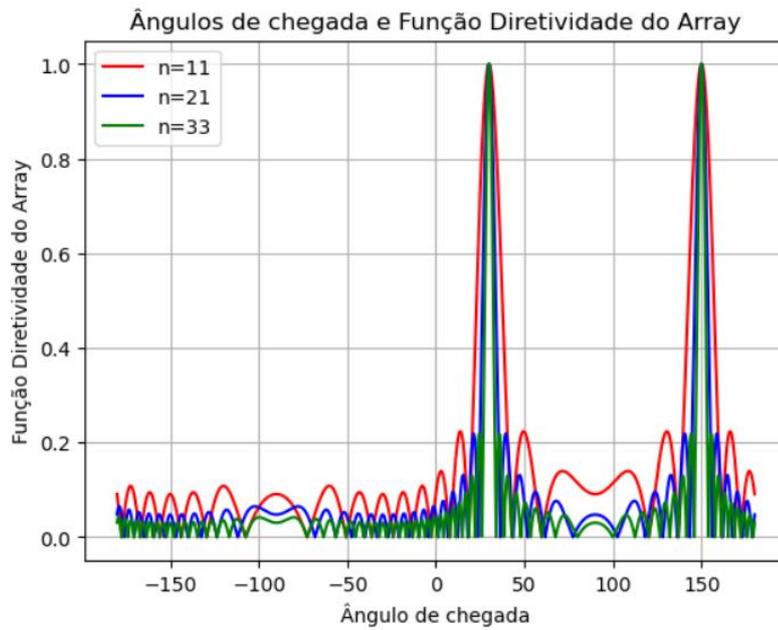


Gráfico 6 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de *Array* para sinal com frequência de 500 Hz.

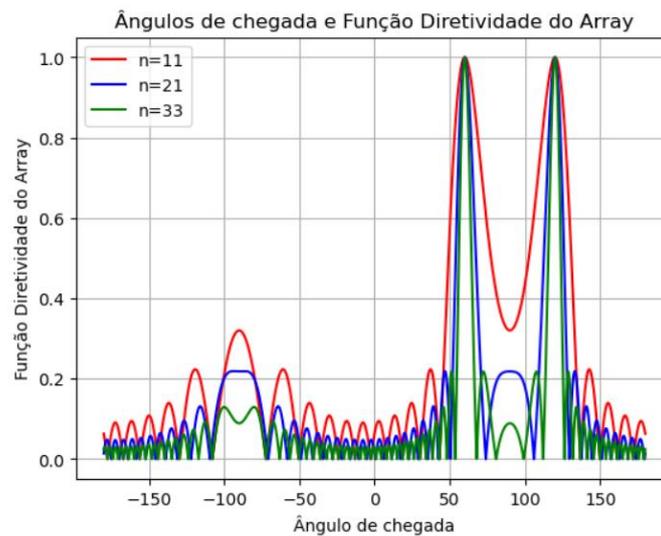


Gráfico 7 - Gráfico de Ângulo de Chegada por diretividade de *Array* para sinal com frequência de 500 Hz.

A análise dos gráficos evidencia que, para sinais com frequência até 750 Hz, o protótipo desenvolvido exibe um índice de diretividade eficaz capaz de distinguir diferentes direções de chegada. Além disso, é perceptível que, à medida que o ângulo de chegada do sinal aumenta, torna-se mais desafiador realizar essa discriminação espacial. Caso a direção de chegada seja maior que  $45^\circ$  surgirão respostas incoerentes, corroborando a característica de campo *end-fire*.

De acordo com os gráficos acima, um *array* de uma única linha, conforme previamente detalhado na seção 2.7.3.1, apresenta ambiguidade polar. Finalmente, conforme o previsto, quanto maior o número de hidrofones utilizados em um *array* menor serão os lóbulos secundários e maior será a capacidade de discriminação espacial.

O próximo passo para análise é compreender como o as duas ULAs em paralelo reduzem a ambiguidade nesse protótipo.

A implementação de cada Unidade Linear de Arranjo (ULA) em paralelo se reflete na diretividade evidenciada nos gráficos desta seção. A resolução da ambiguidade deriva da análise dos tempos de chegada do sinal em cada linha do arranjo. Quando ocorre uma resposta direcional ambígua, indicando incerteza entre esquerda e direita, a eliminação dessa ambiguidade é alcançada ao determinar em qual linha o sinal chegou primeiro. Esse método proporciona uma resposta direcional mais precisa. No entanto, embora essa abordagem demonstre precisão, é importante notar que, dependendo do ângulo de direção de chegada e da frequência do sinal, há o potencial de ocorrer *aliasing*, interferindo no cálculo do tempo de atraso. Essa interferência compromete a eficácia da eliminação da ambiguidade, ou seja, para um sinal frequências muito mais altas ou muito mais baixas que a frequência de projeto, ou ainda, para ângulos de chegada maiores que  $45^\circ$  será mais complexo discernir a direcionalidade.

(47)

#### 4.5.2 – Previsão de Alcance Sonar.

A Previsão de Alcance Sonar do protótipo se encaixa na descrição de previsão de alcance de um sonar passivo, para realizar tal previsão é necessário utilizar a equação 18.

Onde o SL a ser utilizado na previsão depende do emissor que em termos práticos é um alvo desconhecido, contudo, considerando que o alvo é um submarino pouco ruidoso, pode-se utilizar os dados de (20) e considerar igual a 115dB. Para essa previsão, o ruído será conforme a situação em (20) considerando-se: 67dB. Em relação ao DI, pode ser utilizada a equação 22 para fazer o cálculo, logo DI é dependente da frequência do sinal esperado, utilizando frequência esperada igual a 500Hz, DI= 19dB. Para o cálculo de DT será estabelecido uma

Probabilidade de Detecção maior que 0,5, ou seja, para valores maiores ou iguais a 0DB são interpretados como submarino detectado. (20)

$$0 = 115 - TL - 67 + 19$$

$$TL \leq 97\text{DB}$$

Utilizando o modelo por perdas esféricas  $TL = 20 \log r$ , tem-se que o alcance máximo para essas configurações é igual a  $r = 2300$  metros.

Dentro dessas configurações é possível observar que o alcance sonar passivo é bastante limitado. Como até serem realizados testes com o protótipo é complexo avaliar o nível de ruído da equação, no gráfico 8 foi plotada uma curva de alcance máximo por nível de ruído produzido já que esses níveis de ruído podem variar por diversos fatores discutidos extensivamente na seção 2.6. Os códigos para geração de gráficos foram feitos em Python e estão contidos no Apêndice B.

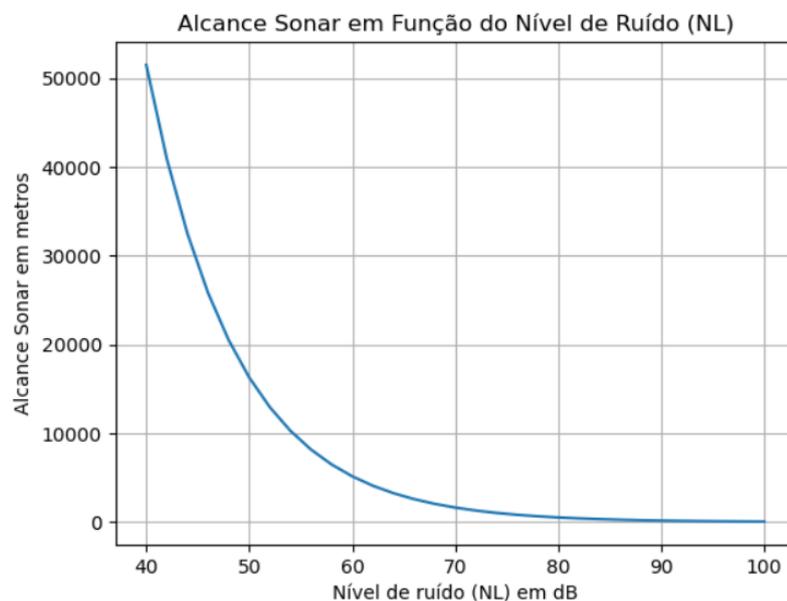


Gráfico 8 – Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a  $20 \log r$ .

No gráfico 8, para o cálculo do máximo alcance foi utilizada como frequência do sinal adquirido como a igual da frequência de projeto do arranjo. Adicionalmente, foi verificado que para NL abaixo de 40 dB os alcances seriam muito alto o que levaria a perda acentuada de

resolução. Utilizando o código fornecido no Apêndice B. Para assegurar uma precisão ainda maior no cálculo, é essencial conhecer o nível de ruído próprio do arranjo. Além disso, é recomendável medir o nível de ruído ambiente das configurações oceânicas antes de iniciar a operação.

Outro fator que se pode alterar para previsão de alcance sonar é o modelo de perdas da propagação utilizado. Nesse ínterim, o modelo utilizado anteriormente é o de perdas esféricas para um ambiente homogêneo. O objetivo agora é utilizar modelos um pouco mais complexos e que se aproximam mais com as configurações de um ambiente oceânico. Para tal, deve ser considerado as perdas por absorção explicitadas na seção 2.4.2. Logo, o total das perdas será calculado pela equação abaixo:

$$TL = 20\log r + \alpha r. \quad (28)$$

No gráfico 4.9 é possível observar o alcance em metros em função do nível de ruído com o fator do coeficiente de absorção. Foi utilizado para a modelagem uma frequência de 500 Hz, que é frequência ótima do sensor.

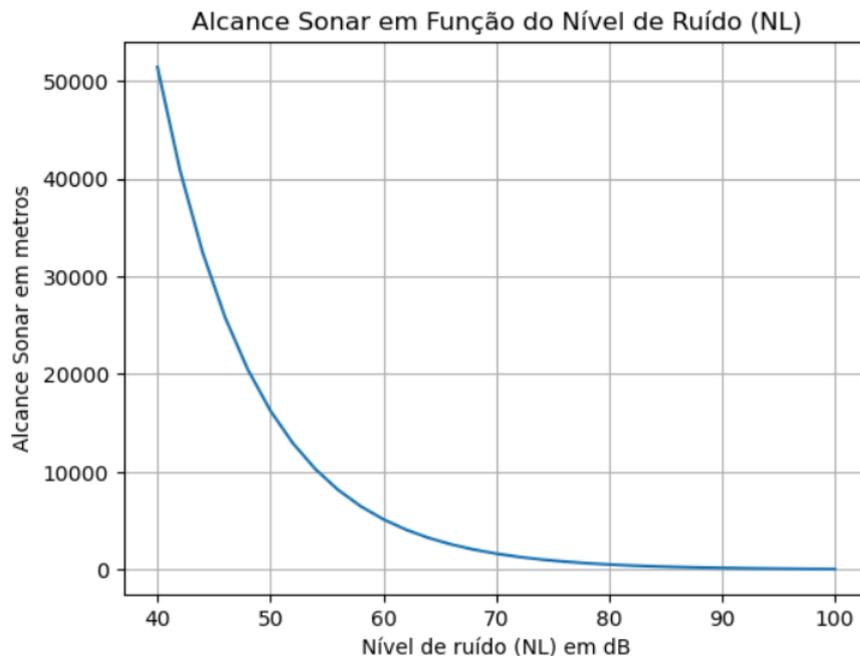


Gráfico 9 - Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a  $20 \log r + \alpha r$ , utilizando 500Hz de frequência.

De acordo com o esperado, por comparação dos dois gráficos gerados em 8 e 9, quando são acrescentadas as perdas por absorção o alcance sonar diminui, contudo ainda são próximos devido a frequência utilizada na comparação possuir pouca absorção. No gráfico 10 é possível observar o comparativo utilizando um sinal de 10KHz. Outro gráfico que é conveniente de ser gerado é o gráfico do alcance em função da variação da frequência. Para tal, continuará a ser utilizado o modelo de perdas com a absorção inclusa, e desta vez o nível de ruído (NL) será fixado em 40 dB. Esse comparativo pode ser avistado no gráfico 11.

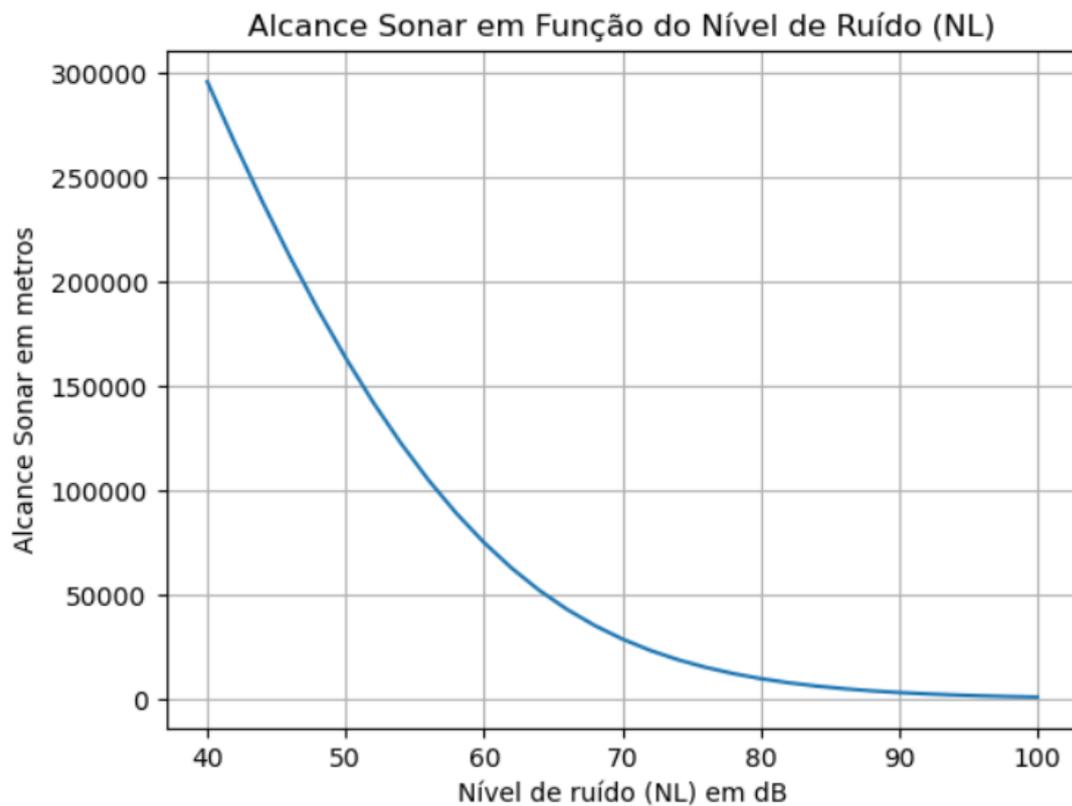


Gráfico 10 - Alcance Sonar em função do Nível do ruído para um modelo de Perdas na propagação igual a  $20 \log r + \alpha r$ , utilizando 10KHz de frequência.

Conforme previsto, ao comparar os gráficos 8, 9 e 10 é possível verificar que ao adicionar as perdas por absorção o alcance sonar diminui, contudo, a redução do alcance sonar é menor para sinais de frequências mais baixas.

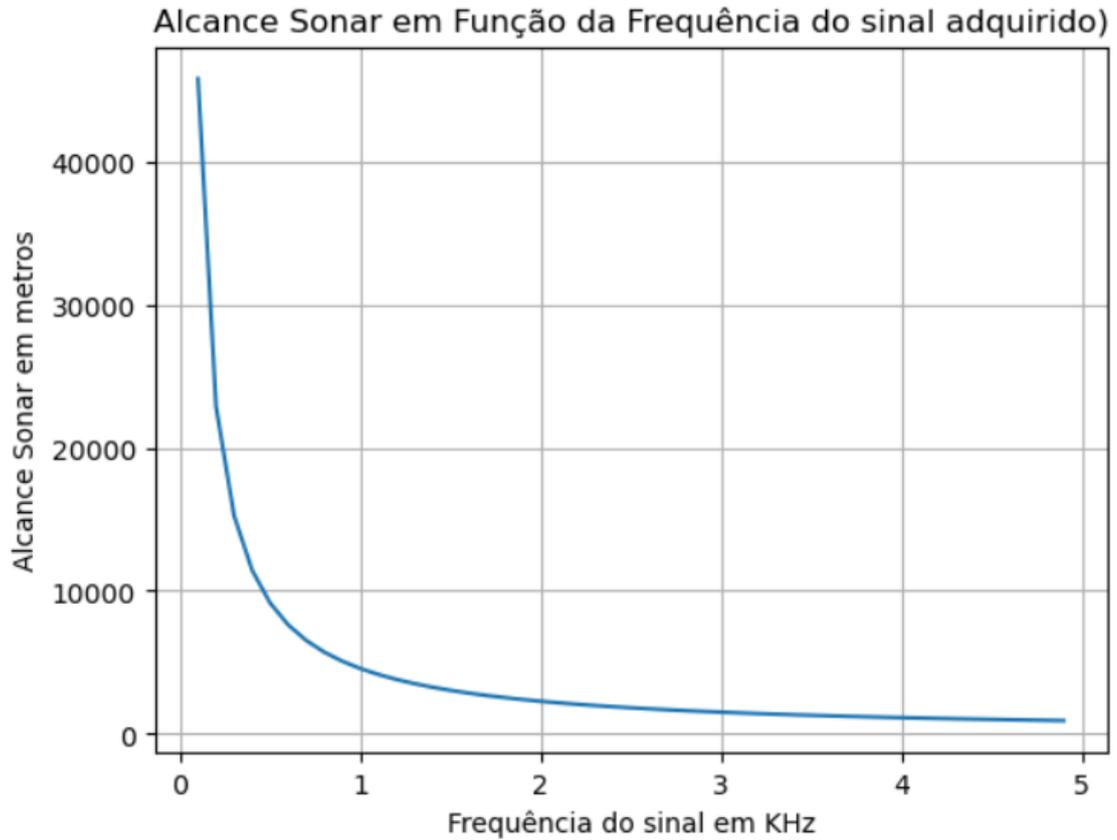


Gráfico 11 - Alcance Sonar em função da Frequência do sinal adquirido para um modelo de Perdas na propagação igual a  $20 \log r + \alpha r$ , utilizando 55dB de nível de ruído.

O gráfico 11 ilustra que quanto maior a frequência maior será atenuação do sinal e menor será o alcance, ou seja, os sinais de baixa frequência podem ser detectados a distâncias maiores, contudo contém resolução menor. Concluindo as análises gráficas dessa seção, o gráfico 12 tem por objetivo ilustrar o alcance sonar com frequência e nível de ruído variando.

Alcance Sonar em Função de Frequência e Nível de Ruído

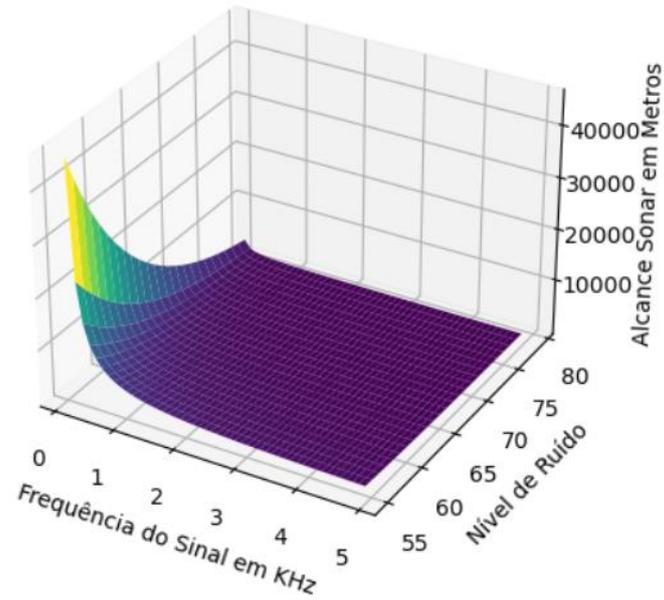


Gráfico 12 - Alcance Sonar em função do nível de ruído e da Frequência do sinal adquirido para um modelo de Perdas na propagação igual a  $20 \log r + \alpha r$ .

O gráfico 12 consegue entregar um modelo do que seria o alcance sonar do protótipo. Apesar disso, esse modelo ainda não pode ser dito como completo porque considera que a profundidade, PH, temperatura e salinidade para um determinado sinal como constante. Para aplicar efetivamente o cálculo do alcance em determinada região devem ser registrados todos esses valores ambientais. Nessa visão é possível concluir que o alcance sonar do protótipo não se restringe a um número e sim a um conjunto de valores que pode variar dentro de fatores ambientais e características do sinal a ser recebido.

## 5 – DISCUSSÃO.

A fim de que se possa discutir os produtos desse estudo. Esse capítulo estará dividido entre:

- Emprego em demais áreas;
- Conclusão; e
- Sugestões para Trabalhos Futuros.

## 5.1 – Emprego em demais áreas.

O Protótipo discutido nesse estudo pode ter atuação em qualquer área que necessite de monitoramento oceânico. Dessa forma, pode-se citar as seguintes áreas que necessitam desse tipo acompanhamento: Bioacústica Marinha e a Geofísica Marinha.

O uso para Bioacústica marinha pode ser caracterizado caso necessite monitorar espécies que estejam longe da costa de forma a ser inviável uma escuta por meio de um arranjo de hidrofones instalado de forma fixa. Além do mais pode ser utilizado ainda para monitorar comportamentos de espécies a distâncias maiores que hidrofones simples ou arranjos menores. Desta forma, amplia-se a capacidade de entender características da acústica de cada espécie, permitindo avaliar interação intraespecífica e interespecie quando indivíduos estão a distâncias maiores entre si.

A geofísica marinha pode se beneficiar consideravelmente da implementação de sensores ativos, devido à sua eficiência na cartografia do relevo subaquático. Contudo, destaca-se que o sensor projetado pode ser empregado de maneira combinada com emissores ativos, de analogamente ao sistema ATAS. Esse arranjo se mostra especialmente vantajoso quando se trata do estudo do comportamento tectônico, pois tem ótima capacidade do sensor de lidar com sinais de alta intensidade e baixa frequência.

Adicionalmente, para a detecção de sinais tectônicos, o sensor requer adaptações para operar em frequências ainda mais baixas, a fim de captar os sinais provenientes dos movimentos das placas submarinas. Visto que tais sinais são caracterizados por sua intensidade considerável e frequência reduzida, uma vantagem é a capacidade do sensor em detectá-los e processá-los de forma passiva, mantendo um alcance significativo.

Além das aplicações previamente abordadas, vale ressaltar que o potencial do protótipo não se limita a essas áreas. Ainda há uma possibilidade de subutilização ao implantá-lo em instalações fixas, localizadas próximas a portos ou ilhas, com a finalidade de monitorar o tráfego marítimo ou ainda registrar informações relacionadas à paisagem acústica.

## 5.2 – Conclusão.

O anteprojeto realizado possui característica inovadora no cenário nacional, pois teve a pretensão de projetar um arranjo com um grande número de hidrofones, que necessitou de buscar soluções para resolver questões de ambiguidade e estabilidade.

De início, a fundamentação teórica forneceu o conteúdo necessário para o desenvolvimento técnico do arranjo. Para construção do arranjo foi delimitada pela composição inicial, a parte mecânica e a parte eletrônica.

Inicialmente, a composição inicial do projeto necessitou atender requisitos mínimos para utilização do protótipo pela MB. Desta forma, foi verificado o que era necessário para possibilitar o uso do arranjo pelas FCT. Após o atendimento dos requisitos foi vista a necessidade de solucionar o problema da ambiguidade do *array* de hidrofones em linha. Para tal necessidade, projetou-se um *array* de hidrofones que possuam duas linhas paralelas, contribuindo para reduzir a ambiguidade polar, conforme demonstrado pelos diagramas de irradiação.

Durante a projeção da parte mecânica surgiu o desafio de criar um arranjo que contenha estabilidade horizontal, seja capaz de suportar a pressão da coluna d'água de projeto, e que contenha o menor ruído próprio possível e reduza ao máximo reflexões incoerentes do sinal. Para atender essas demandas, foi necessária uma estrutura completa com cauda, cabo de reboque, VIM e mangueira com o conjunto de hidrofones propriamente. Cada componente, foi projetado com materiais cuidadosamente selecionado para potencializar as capacidades do sensor para ASW.

Para os itens eletrônicos, foram pensados em sensores que tivessem a sensibilidade e que tivessem compatibilidade com o arranjo mecânico. Neste íterim, pode-se afirmar que as soluções apresentadas atenderam os objetivos do projeto. Pois conseguiu projetar um TAS que pode ser implantado nas FCT.

Como a construção efetiva do arranjo não ocorreu e, conseqüentemente, os testes de validação do dispositivo não foram realizados, a avaliação do seu desempenho se limitou ao âmbito teórico. Essa avaliação se baseia nos diagramas de irradiação, que demonstraram que o arranjo alcançou uma capacidade satisfatória para distinguir direções de chegada nas

frequências de interesse; e nas previsões de alcance sonar, que permitiram uma análise da capacidade de detecção do dispositivo.

Após a análise dos dois métodos e a comparação com outros tipos de sensores empregados na guerra antissubmarino, destaca-se que a capacidade do sensor apresentado sobressai em dois aspectos. Inicialmente, ele se impõe por sua precisão em determinar a direção da ameaça. Além disso, ele se distingue pelo alcance de detecção passiva ampliado, o que se deve à sua capacidade de se afastar significativamente do ruído próprio, juntamente com sua maior sensibilidade e ganho para sinais de frequências mais baixas.

### **5.3 – Sugestões para trabalhos futuros.**

Apesar do estudo trazer um dispositivo complexo, não foi possível realizar o protótipo, logo como trabalho futuro pode ser a realização do protótipo completo projetado assim como a validação em testes tanto em laboratório quanto no mar.

O processamento de sinais do estudo foi realizado de forma simples, para trabalhos mais adiantes podem ser realizadas técnicas de processamento mais atuais e complexas.

O Arranjo Rebocado de Sonar Passivo é eficiente para uma vasta gama de aplicações, contudo há alguns cenários modernos em que a necessidade de implantar um elemento ativo. Após pesquisa realizada, não foi visto nenhum trabalho no país sobre o tema. Logo, aliar esse protótipo a um emissor ativo pode ser um projeto futuro que acrescente a capacidade de ASW da Esquadra.

Outra possibilidade futura é desenvolver um trabalho que utilize outras técnicas de eliminação de ambiguidade mais precisas e desenvolver outro tipo de VIM.

## REFERÊNCIAS

- (1) BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa. Estratégia Nacional de Defesa.** Versão enviada para apreciação do Congresso Nacional. Brasília, 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy\\_of\\_estado-edefesa/pnd\\_end\\_congresso\\_.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-edefesa/pnd_end_congresso_.pdf). Acesso em: 25 mai. 2023.
- (2) BRASIL. Comando da Marinha. **Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040).** Brasília, DF: EMA, 2020.
- (3) ALMEIDA, Luciana Santos de. Espinha dorsal da Fragata Classe “Tamandaré” é concluída. **Agência de Notícias da Marinha**, Brasília-DF, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/agenciadenoticias/espinha-dorsal-da-fragata-classe-tamandare-e-concluida>. Acesso em: 20Ago2023.
- (4) BRANDÃO, Miguel Castro. **(Com)Viver com o Inimigo - A Atividade Submarina Alemã Durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) – Interações na Costa de Esposende.** 2015. Dissertação (Mestrado em História) – Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.
- (5) UBOAT.NET. **Site da U-Boat, 2022.** All U-Boats of World War Two. Disponível em: <https://uboat.net/boats/>. Acesso em: 19Mai2023.
- (6) NOTHEN, Maurício Reis. **A Evolução do Pensamento em Estratégia Marítima – Paradigmas para a formulação e Implementação de Políticas Marinhas.** 2014. Dissertação (Mestrado em Estudos Estratégicos Internacionais) – Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- (7) LEÃO, João Paulo Carvalho Ferreira. **Comunicações Rádio Subaquáticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- (8) GALANTE, Alexandre. Como funciona o Sonar Ativo?. **Poder Naval**, 17 jan. 2018. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/01/17/como-funciona-o-sonar-ativo/>. Acesso em: 28jun 2023.

- (9) URICK, Robert J. **Principles of Underwater Sound**. 3<sup>a</sup> ed. London: Mc Graw-Hill Book Company, 1983.
- (10) SILVA, Paulo Rodrigues Rocha da Silva. **A Viabilidade de um Sistema Hidroacústico de Monitoramento de Tráfego Marítimo da Amazônia Azul**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Acústica) - Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2022.
- (11) CLAY, C. S.; MEDWIN H. **Acoustical Oceanography: Principles and Applications**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1977.
- (12) RODRIGUES, Clóves Gonçalves. **Ondas, acústica, psicoacústica e Poluição sonora**. Goiânia: Ed. do autor, 2020.
- (13) HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Vol. 2: Fundamentos de Física**. 10<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2015.
- (14) KINSLER, Lawrence E.; et al. **Fundamentals of Acoustics**. 4ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- (15) TALLEY; et al. **Descriptive Physical Ocean: An Introduction**. 6ed. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2011.
- (16) VIEIRA, Danilo Rodrigues. Curso de Oceanografia Física Descritiva: Capítulo 5. **D.R.V.**, 2023. Disponível em: <https://www.danilorvieira.com/disciplinas/iof1202/>. Acesso em: 22Ago2023.
- (17) CORREA JUNIOR, Carlos. **Estudo da Propagação Acústica no Mar na Camada de Mistura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2008.
- (18) HODGES, Richard P. **Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar**. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2010.

- (19) BREKHOVSKIKH, L, M.; LYSANOV, Y, P. **Fundamentals of Ocean Acoustics**. 2ed. New York: Springer-Verlag, 1991.
- (20) RICHTER, Renan Miranda. **Alcance sonar em águas oceânicas rasas e suas implicações para a Guerra Antissubmarino no território brasileiro**. In: **PRÊMIO MAGALHÃES MOTTA**, 2021, Rio de Janeiro. Prêmio Magalhães Motta, 2021.
- (21) NIEUKIRK, Sharon. Understanding Ocean Acoustics. **Nacional Oceanic Atmospheric Administration Ocean Exploration**, 26 ago. 2022. Disponível em:  
<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/sound01/background/acoustics/acoustics.html>  
Acesso em: 28 jun. 2023.
- (22) DISCOVERY OF SOUND IN THE SEA.. **Site da Discovery of sound in the sea**, 2021. Sound travel in the SOFAR channel. Disponível em:  
<https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/sound-travel-in-the-sofar-channel/>. Acesso em: 28 jun.2023.
- (23) DE SOUZA, Luiz A. Lopes. **Princípios de Sonar**. Marinha do Brasil. Instituto de Pesquisa da Marinha. 1AEd,1997.
- (24) WAITE, Ashley D. **Sonar for Practising Engineers**. 3ª ed. United Kingdom: John Wiley and Sons, 2002.
- (25) COATES, Rodney F. W. **The Advanced Sonar Course: Further Topics In Underwater Acoustics**. Seiche: Com Limited ,2001.
- (26) BUTLER, J. L; SHERMAN, C. H. **Transducers And Arrays For Underwater Sound. Modern Acoustics and Signal Processing**. New York: Springer, 2016.
- (27) VAN TREES, H. L. **Optimum Array Processing: Part IV: Detection, Estimation, and Modulation Theory**. New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- (28) BOZZI, Fabricio Abreu; MARTINS, Carlos Alfredo Orfão; BARREIRA, Leonardo Martins. **Avaliação da geometria de um arranjo de hidrofones em linha através de simulação em escala reduzida**. In: **XI ENCONTRO DE TECNOLOGIA EM ACÚSTICA SUBMARINA**, 2014, Rio de Janeiro. XI Encontro de Tecnologia em Acústica, 2014.

- (29) DE MOURA, Natanael Nunes. **Conformação adaptativa de feixes aplicada em sistemas de sonar passivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 1997.
- (30) EIGES, Ron. **Circular Arrays Techniques for Sonar Application**. Thesis (P.H.D in Electronic Engineering) – Department of Electronic and Electrical Engineering University of London, London, United Kingdom, 1993.
- (31) MARREIROS, João Paulo Ramalho. **Vigilância Acustica dos Espaços Marítimos sob Soberania ou Jurisdição Nacional**. Trabalho de Investigação Individual (Curso de Promoção a Oficial General 2017/2018) – Departamento de Estudos Pós-Graduados do Instituto Universitário Militar, Pedrouços, Porto, Portugal, 2018.
- (32) HOLLER, R. A. The evolution of the sonobuoy from the World War II to the Cold War. **US Navy Journal of Underwater Acoustics**, n.62, Issue 2, p. 322-346. Abr. 2012.
- (33) COLIN, Mathieu Edouard Guy Didier. **Underwater detection, classification and localisation: Improving the capabilities of towed sonar arrays**. Proefschrift (Doctor Ingénieur) - Ecole Nationale Supérieure des Etudes et Techniques d'Armement aan de Technische Universiteit Delft, Brest, Frankrijk geboren te Straatsburg, Frankrijk, 2011.
- (34) KAOURI, Katerina. **Left-Right Ambiguity Resolution of a Towed Array Sonar**. Thesis (Master of Science in Mathematical Modelling and Scientific Computing) – Sommerville College University of Oxford, Trinity, United Kingdom, 2000.
- (35) SANTANA, Warlei Gripp. **Contribuições ao Desenvolvimento de um arranjo de hidrofones para medições no mar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2001.
- (36) AN, Sangkyum; LEE,Keunhwa; SEONG, Woojae. Optimal Operating Depth Search for Active Towed Array Sonar using Simulated Annealing. **Defence Science Journal**, Seoul, Republic of Korea, vol. 69, n. 4, p. 415-419, jul. 2019.

(37) RODRIGUES, Mario Luiz Castro. **Base Industrial de Defesa: Análise da capacidade dos estaleiros nacionais para construção naval brasileira.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia) – Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro-RJ, 2022.

(38) MARTINI, Fernando de. Classe Tamandaré: capitalizações, ToT`s e compensações. **Poder Naval**, 15 jul. 2022. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2022/07/15/classe-tamandare-capitalizacoes-tots-e-compensacoes/>. Acesso em: 1 set. 2023.

(39) OLIVEIRA, Danilo. Batimento de quilha da fragata Tamandaré ocorre nesta sexta (24). **Portos e navios**, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/ind-naval-e-offshore/batimento-de-quilha-da-fragata-tamandare-ocorre-nesta-sexta-feira-24>. Acesso em: 2 set. 2023.

(40) ÁGUAS AZUIS TECNOLOGIA NAVAL. **Site da Águas Azuis Tecnologia Naval**, 2023. Fragata classe Tamandaré. Disponível em: <https://aguasazuis.com.br/>. Acesso em: 2 set. 2023.

(41) CAIAFA, Roberto. Fragatas “Classe Tamandaré” estão em fase avançada de configuração. **Caiafa Master**, 10 jun. 2021. Disponível em: <https://caiafamaster.com.br/fragatas-classe-tamandare-estao-em-fase-avancada-de-configuracao/>. Acesso em: 2 set. 2023.

(42) THYSSENKRUPP MARINE SYSTEMS. **Site da Thyssenkrupp Marine Systems**, 2023. Corvettes & Light Frigates. Disponível em: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/surface-vessels/light-frigates>. Acesso em 2 set. 2023.

(43) ATLAS ELEKTRONIK. **Site da Atlas Elektronik**, 2023. ACTASM – Mobile Mission Module. Disponível em: <https://www.atlas-elektronik.com/solutions/anti-submarine-systems/actas.html>. Acesso em: 10 set. 2023.

(44) CALDEIRA, Antônio Walker Sibanto. **Desenvolvimento de um array de hidrofones linear rebocado para experimento no mar.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado

em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2017.

(45) DA SILVA, José Roberto Motta. **Detecção e localização acústica em águas rasas usando Transformada Wavelet contínua e outras técnicas**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2005.

(46) MOHAPATRA, S; et al. Triplet Sensors in Towed Array Systems. **SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering**, Karnataka, India, vol. 9 Issue 7, p. 7-12, jul. 2022.

(47) CARDOSO, Stilson Veras. **Resolution of port/starboard ambiguity using a linear array of triplets and a twin-line planar array**. Thesis (Master of Science in Engineering Acoustics) – Naval Postgraduate School, Monterrey, CA, United States of America, 2016.

(48) CHEN, F.H; JIANG, B. **Performance analysis of port-starboard discrimination for towed twin-line array**. In: **16TH EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE (EUSIPCO 2008)**, 2008, Lausanne, Switzerland. 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2008), 2008.

(49) SCHNEIDER, D; HOFFMANN, C. **Towed Array Technology: Development for a better Sonar System Performance**. In: **PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE “UNDERWATER ACOUSTIC MEASUREMENTS: TECHNOLOGIES & RESULTS”**, 2005, Heraklion, Crete, Greece. Proceedings of the International Conference “Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results”, 2005.

(50) SOUTO, Fabio. **FIBRE OPTIC TOWED ARRAY: THE HIGH-TECH COMPACT SOLUTION FOR NAVAL WARFARE**. In: **PROCEEDINGS OF ACOUSTICS 2013**, 2013, Victor Harbor, Australia. Proceedings of Acoustics 2013, 2013.

(51) SCHINAULT, Matthew. **Development of a Prototype Towed Coherent Hydrophone Array System**. Thesis (Master of Science in Electrical and Computer Engineering) – Northeastern University Boston, Massachusetts, USA, 2020.

(52) BATMAZ, Ömer. **Vibration isolation module design for a towed array**. Thesis ( Master of Science in Mechanical Engineering) - The Graduate School of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Turkey, 2014.

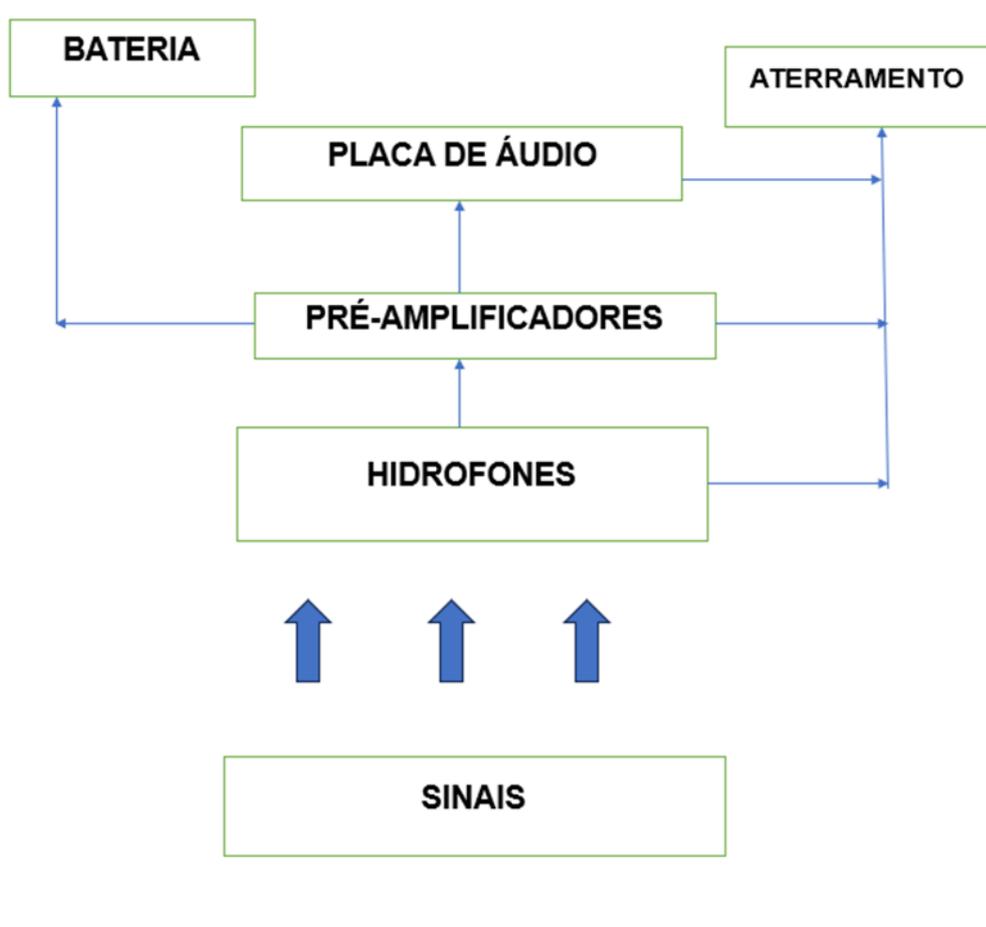
(53) MCGOWAN G. A.; MACCLOCH D. B. **Vibration Isolation Module for Sonar Towed Arrays**. Procurador: Hughes Aircraft Company, Los Angeles, Calif. US4660183 A. Depósito: 22.set 1986. Concessão: 21 abr. 1987.

(54) BENTHOWAVE INSTRUMENT INC. **Site da Benthowave**, 2023. Acoustic Elements for Arrays, Streamers and Beacons. Disponível em: <https://www.benthowave.com/products/BII-7140Hydrophone.html>. Acesso em: 7out. 2023.

(55) BENTHOWAVE INSTRUMENT INC. **Site da Benthowave**, 2023. Hydrophone and Ultrasonic Preamplifier. Disponível em: <https://www.benthowave.com/products/preamplifier.html>. Acesso em: 7out. 2023.

(56) TASCAM. **Site da TASCAM**, 2023. US-800. Disponível em: <https://tascam.com/us/product/us-800/download>. Acesso em: 7out. 2023.

## APENDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO DO PROTÓTIPO.



## APENDICE B – CÓDIGO EM PYTHON PARA ALCANCE SONAR.

### CÓDIGO PARA CÁLCULO DO ALCANCE SONAR EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO, UTILIZANDO O MODELO DE PERDAS NA PROPAGAÇÃO IGUAL A 20 LOG R.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
dt = 0 # Para cálculo de TL máximo para Probabilidade de Detecção igual a 0,5.
sl = 115 # nível de fonte (emissão) em dB
nl = np.arange(40, 101, 2) # nível de ruído em dB
M = 2 # número de linhas do arranjo
n = 21 # Exemplo do número de hidrofones por linha
f = 500
fo = 500
# Cálculo de DI
di = 3 + 10 * np.log10(M * n) + 20 * np.log10(f / fo)
tl = sl - dt - nl + di # perda de transmissão
print(tl)
r = 10 ** (tl/20) # cálculo do alcance máximo para cada nível de ruído em metros usando a
fórmula TL = 20 log R
print(r)
plt.plot(nl, r)
plt.title('Alcance Sonar em Função do Nível de Ruído (NL)')
plt.xlabel('Nível de ruído (NL) em dB')
plt.ylabel('Alcance Sonar em metros')
plt.grid(True)
plt.show()

```

### CÓDIGO PARA CÁLCULO DO ALCANCE SONAR EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO, UTILIZANDO O MODELO DE PERDAS NA PROPAGAÇÃO IGUAL A 20 LOG R + $\alpha R$ .

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import bisect

# Função para calcular o valor de alfa com base no modelo mais detalhado
def calcular_alfa(T, S, D, pH, F):
    # Constantes do modelo
    A1 = 8.86 * 10**(0.78 * pH - 5)
    P1 = 1

```

```

F1 = 2.8 * ((S / 35)**0.5) * 10**(4 - (1245 / (T + 273)))

A2 = 21.44 * S / (1412 + 3.2 * T + 1.19 * S + 0.0167 * D) * (1 + 0.025 * T)
P2 = 1 - 1.37 * 10**(-4) * D + 6.2 * 10**(-9) * D**2
F2 = 8.17 * 10**(8 - 1990 / (T + 273)) / (1 + 0.0018 * (S - 35))

if T < 20:
    A3 = 4.937 * 10**(-4) - 2.59 * 10**(-5) * T + 9.11 * 10**(-7) * T**2 - 6.5 * 10**(-8) *
T**3
else:
    A3 = 3.964 * 10**(-4) - 1.146 * 10**(-5) * T + 1.45 * 10**(-7) * T**2 - 6.5 * 10**(-8) *
T**3

P3 = 1 - 3.83 * 10**(-5) * D + 4.9 * 10**(-10) * D**2

# Cálculo de alfa baseado no modelo
alfa = A1 * (MgSO4(T, D, pH, F)**2) + A2 * (BOH3(T, pH, F)**2) + A3 * (MgCO3(T, pH,
F)**2) + 0.0003 * F**2

return alfa

# Funções de relaxação iônica
def MgSO4(T, D, pH, F):
    a1 = 0.5 * 10**(-D/20)
    f1 = 50 * 10**(T/60)
    return a1 * F**2 / (f1**2 + F**2)

def BOH3(T, pH, F):
    a2 = 0.10 * 10**(pH - 8)
    f2 = 0.90 * 10**(T/70)
    return a2 * F**2 / (f2**2 + F**2)

def MgCO3(T, pH, F):
    a3 = 0.03 * 10**(pH - 8)
    f3 = 4.5 * 10**(T/30)
    return a3 * F**2 / (f3**2 + F**2)

# Função para calcular a perda de transmissão (TL) usando a fórmula dada
def calcular_tl(nl, sl, dt, di):
    return sl - dt - nl + di

# Função para encontrar o valor de R que satisfaz a equação TL = 20logR + alfaR
def encontrar_R(nl, sl, dt, di, alfa):
    # Defina a função objetivo para bisseção
    objetivo = lambda R: 20 * np.log10(R) + alfa * R - calcular_tl(nl, sl, dt, di)

    # Estimativas iniciais ajustadas conforme necessário
    R_min = 1e-6 # Evita log(0) na função objetivo
    R_max = 1e6

```

```

# Verifique os sinais da função nos limites iniciais
if np.sign(objetivo(R_min)) == np.sign(objetivo(R_max)):
    raise ValueError("Os limites iniciais não contêm uma raiz. Ajuste os limites iniciais
manualmente.")

# Encontrar a raiz usando bisseção
R_raiz = bisect(objetivo, R_min, R_max)

return R_raiz

# Função para calcular o Índice de Direcionamento (DI)
def calcular_di(M, f, fo, n):
    return 3 + 10 * np.log10(M * n) + 20 * np.log10(f / fo)

# Parâmetros de entrada
dt = 0
sl = 115
nl = np.arange(40, 101, 2) # Ajustei os valores para ter uma faixa mais ampla
M = 2 # número de linhas do arranjo
n = 21 # Exemplo do número de hidrofones por linha

# Parâmetros ambientais (ajuste conforme necessário)
T = 16 # Temperatura em graus Celsius
S = 35 # Salinidade
D = 50 # Profundidade
F = 0.5 # Frequência em KHz (exemplo)
pH = 8.0 # Valor de pH (exemplo)
c = 1412 + 3.2 * T + 1.19 * S + 0.0167 * D # Cálculo de c conforme fornecido

# Frequência do sonar
F_sonar = 0.5 # Frequência em KHz

# Cálculo de alfa
alfa = calcular_alfa(T, S, D, pH, F) * 0.001 # O alfa original tem como unidade db/km, logo há
a necessidade de passar para db/m.

# Cálculo de DI
di = calcular_di(M, F, F_sonar, n)

# Cálculo de TL
tl = calcular_tl(nl, sl, dt, di)

# Encontrar o valor de R para cada tl e alfa calculados
R_valores = [encontrar_R(nl_i, sl, dt, di, alfa) for nl_i in nl]

# Plotagem do gráfico
plt.plot(nl, R_valores)
plt.title('Alcance Sonar em Função do Nível de Ruído (NL)')

```

```
plt.xlabel('Nível de ruído (NL) em dB')
plt.ylabel('Alcance Sonar em metros')
plt.grid(True)
plt.show()
```

### **CÓDIGO PARA CÁLCULO DO ALCANCE SONAR EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DO SINAL ADQUIRIDO UTILIZANDO O MODELO DE PERDAS NA PROPAGAÇÃO IGUAL A $20 \text{ LOG } R + \alpha R$ .**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import bisect

# Função para calcular o valor de alfa com base no modelo mais detalhado
def calcular_alfa(T, S, D, pH, F):
    # Constantes do modelo
    A1 = 8.86 * 10**(0.78 * pH - 5)
    P1 = 1
    F1 = 2.8 * ((S / 35)**0.5) * 10**(4 - (1245 / (T + 273)))

    A2 = 21.44 * S / (1412 + 3.2 * T + 1.19 * S + 0.0167 * D) * (1 + 0.025 * T)
    P2 = 1 - 1.37 * 10**(-4) * D + 6.2 * 10**(-9) * D**2
    F2 = 8.17 * 10**(8 - 1990 / (T + 273)) / (1 + 0.0018 * (S - 35))

    if T < 20:
        A3 = 4.937 * 10**(-4) - 2.59 * 10**(-5) * T + 9.11 * 10**(-7) * T**2 - 6.5 * 10**(-8) * T**3
    else:
        A3 = 3.964 * 10**(-4) - 1.146 * 10**(-5) * T + 1.45 * 10**(-7) * T**2 - 6.5 * 10**(-8) * T**3

    P3 = 1 - 3.83 * 10**(-5) * D + 4.9 * 10**(-10) * D**2

    # Cálculo de alfa baseado no modelo
    alfa = A1 * (MgSO4(T, D, pH, F)**2) + A2 * (BOH3(T, pH, F)**2) + A3 * (MgCO3(T, pH, F)**2) + 0.0003 * F**2

    return alfa

# Funções de relaxação iônica
def MgSO4(T, D, pH, F):
    a1 = 0.5 * 10**(-D/20)
    f1 = 50 * 10**(T/60)
    return a1 * F**2 / (f1**2 + F**2)

def BOH3(T, pH, F):
    a2 = 0.10 * 10**(pH - 8)
    f2 = 0.90 * 10**(T/70)
```

```

return a2 * F**2 / (f2**2 + F**2)

def MgCO3(T, pH, F):
    a3 = 0.03 * 10**(pH - 8)
    f3 = 4.5 * 10**(T/30)
    return a3 * F**2 / (f3**2 + F**2)

# Função para calcular a perda de transmissão (TL) usando a fórmula dada
def calcular_tl(nl, sl, dt, di):
    return sl - dt - nl + di

# Função para calcular DI
def calcular_di(M, F_sonar, F, n):
    return 3 + 10 * np.log10(M * n) + 20 * np.log10(F_sonar / F)

# Função para encontrar o valor de R que satisfaz a equação  $TL = 20\log R + \alpha R$ 
def encontrar_R(nl, sl, dt, di, alfa):
    # Defina a função objetivo para bisseção
    objetivo = lambda R: 20 * np.log10(R) + alfa * R - calcular_tl(nl, sl, dt, di)

    # Estimativas iniciais ajustadas conforme necessário
    R_min = 1e-6 # Evita log(0) na função objetivo
    R_max = 1e6

    # Verifique os sinais da função nos limites iniciais
    if np.sign(objetivo(R_min)) == np.sign(objetivo(R_max)):
        raise ValueError("Os limites iniciais não contêm uma raiz. Ajuste os limites iniciais manualmente.")

    # Encontrar a raiz usando bisseção
    R_raiz = bisect(objetivo, R_min, R_max)

    return R_raiz

# Parâmetros de entrada
dt = 0
sl = 115
nl = 55 #Fixado o valor de nível de ruído para comparar as variações de frequência.
M = 2
n = 21

# Parâmetros ambientais (ajuste conforme necessário)
T = 16 # Temperatura em graus Celsius
S = 35 # Salinidade
D = 50 # Profundidade
F = np.arange(0.1, 5, 0.1) # Frequência em KHz (exemplo)
pH = 8.0 # Valor de pH (exemplo)
c = 1412 + 3.2 * T + 1.19 * S + 0.0167 * D # Cálculo de c conforme fornecido

```

```

# Frequência do sonar
F_sonar = 0.500 # Frequência em KHz

# Cálculo de DI
di = calcular_di(M, F_sonar, F, n)

# Cálculo de alfa
alfa = calcular_alfa(T, S, D, pH, F) * 0.001 # O alfa original tem como unidade db/km, logo há
a necessidade de passar para db/m.

# Cálculo de TL
tl = calcular_tl(nl, sl, dt, di)

# Encontrar o valor de R para cada tl e alfa calculados
R_valores = [encontrar_R(nl, sl, dt, di_i, alfa_i) for di_i, alfa_i in zip(di, alfa)]

# Plotagem do gráfico
plt.plot(F, R_valores)
plt.title('Alcance Sonar em Função da Frequência do sinal adquirido')
plt.xlabel('Frequência do sinal em KHz')
plt.ylabel('Alcance Sonar em metros')
plt.grid(True)
plt.show()

```

**CÓDIGO PARA CÁLCULO DO ALCANCE SONAR EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE RUÍDO E DA FREQUÊNCIA DO SINAL ADQUIRIDO UTILIZANDO O MODELO DE PERDAS NA PROPAGAÇÃO IGUAL A  $20 \text{ LOG } R + \alpha R$ .**

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import bisect

# Função para calcular o valor de alfa com base no modelo mais detalhado
def calcular_alfa(T, S, D, pH, F):

    # Constantes do modelo

    A1 = 8.86 * 10**(0.78 * pH - 5)

    P1 = 1

    F1 = 2.8 * ((S / 35)**0.5) * 10**(4 - (1245 / (T + 273)))

```

$$A2 = 21.44 * S / (1412 + 3.2 * T + 1.19 * S + 0.0167 * D) * (1 + 0.025 * T)$$

$$P2 = 1 - 1.37 * 10^{(-4)} * D + 6.2 * 10^{(-9)} * D^{**2}$$

$$F2 = 8.17 * 10^{(8 - 1990 / (T + 273))} / (1 + 0.0018 * (S - 35))$$

if T < 20:

$$A3 = 4.937 * 10^{(-4)} - 2.59 * 10^{(-5)} * T + 9.11 * 10^{(-7)} * T^{**2} - 6.5 * 10^{(-8)} * T^{**3}$$

else:

$$A3 = 3.964 * 10^{(-4)} - 1.146 * 10^{(-5)} * T + 1.45 * 10^{(-7)} * T^{**2} - 6.5 * 10^{(-8)} * T^{**3}$$

$$P3 = 1 - 3.83 * 10^{(-5)} * D + 4.9 * 10^{(-10)} * D^{**2}$$

# Cálculo de alfa baseado no modelo

$$\text{alfa} = A1 * (\text{MgSO4}(T, D, \text{pH}, F)^{**2}) + A2 * (\text{BOH3}(T, \text{pH}, F)^{**2}) + A3 * (\text{MgCO3}(T, \text{pH}, F)^{**2}) + 0.0003 * F^{**2}$$

return alfa

# Funções de relaxação iônica

def MgSO4(T, D, pH, F):

$$a1 = 0.5 * 10^{(-D/20)}$$

$$f1 = 50 * 10^{(T/60)}$$

$$\text{return } a1 * F^{**2} / (f1^{**2} + F^{**2})$$

```
def BOH3(T, pH, F):
```

```
    a2 = 0.10 * 10**(pH - 8)
```

```
    f2 = 0.90 * 10**(T/70)
```

```
    return a2 * F**2 / (f2**2 + F**2)
```

```
def MgCO3(T, pH, F):
```

```
    a3 = 0.03 * 10**(pH - 8)
```

```
    f3 = 4.5 * 10**(T/30)
```

```
    return a3 * F**2 / (f3**2 + F**2)
```

```
# Função para calcular a perda de transmissão (TL) usando a fórmula dada
```

```
def calcular_tl(nl, sl, dt, di):
```

```
    return sl - dt - nl + di
```

```
# Função para encontrar o valor de R que satisfaz a equação  $TL = 20\log R + \alpha R$ 
```

```
def encontrar_R(nl, sl, dt, di, alfa):
```

```
    # Defina a função objetivo para bisseção
```

```
    objetivo = lambda R: 20 * np.log10(R) + alfa * R - calcular_tl(nl, sl, dt, di)
```

```
    # Estimativas iniciais ajustadas conforme necessário
```

```
    R_min = 1e-6 # Evita log(0) na função objetivo
```

```
    R_max = 1e6
```

```
    # Verifique os sinais da função nos limites iniciais
```

```
    if np.sign(objetivo(R_min)) == np.sign(objetivo(R_max)):
```

```
raise ValueError("Os limites iniciais não contêm uma raiz. Ajuste os limites iniciais manualmente.")
```

```
# Encontrar a raiz usando bisseção
```

```
R_raiz = bisect(objetivo, R_min, R_max)
```

```
return R_raiz
```

```
# Parâmetros de entrada
```

```
dt = 0
```

```
sl = 115
```

```
# Parâmetros ambientais (ajuste conforme necessário)
```

```
T = 16 # Temperatura em graus Celsius
```

```
S = 35 # Salinidade
```

```
D = 50 # Profundidade
```

```
F_values = np.arange(0.1, 5, 0.1) # Frequência em KHz (valores ajustáveis)
```

```
nl_values = np.arange(55, 80, 1) # Níveis de ruído (valores ajustáveis)
```

```
# Valores específicos para M e n
```

```
M = 2
```

```
n = 21
```

```
di = 3 + 10 * np.log10(M * n) + 20 * np.log10(0.5 / F_values) # Cálculo de DI
```

```
# Criação de uma grade 2D para combinar diferentes valores de F e nl
```

```
F_grid, nl_grid = np.meshgrid(F_values, nl_values)

# Cálculo de alfa para cada combinação de F e nl
alfa_values = calcular_alfa(T, S, D, pH, F_grid) * 0.001 # Convertendo para db/m

# Inicialização de uma matriz para armazenar os valores de R
R_matrix = np.zeros_like(F_grid)

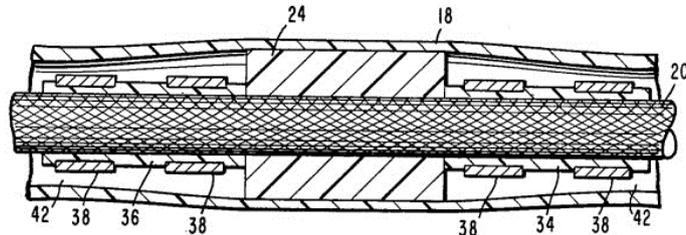
# Preenchimento da matriz com os valores de R para cada combinação de F e nl
for i in range(len(nl_values)):
    for j in range(len(F_values)):
        R_matrix[i, j] = encontrar_R(nl_values[i], sl, dt, di[j], alfa_values[i, j])

# Criação do gráfico 3D
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(F_grid, nl_grid, R_matrix, cmap='viridis')

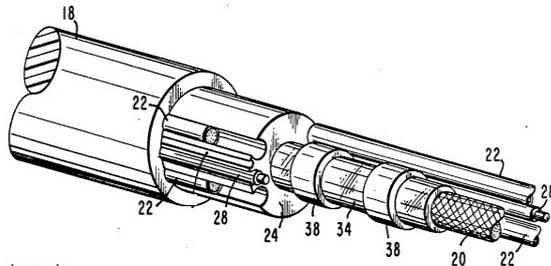
ax.set_title('Alcance Sonar em Função de Frequência e Nível de Ruído')
ax.set_xlabel('Frequência do Sinal em KHz')
ax.set_ylabel('Nível de Ruído')
ax.set_zlabel('Alcance Sonar em Metros')

plt.show()
```

## ANEXO A – VISTAS DO PROTÓTIPO DE VIM.



Legenda:  
 18 – Mangueira Externa  
 20 – Cabo flexível  
 24 – Espaçadores  
 34 – Luvas  
 36- Luvas  
 38 – Anéis de Crimpagem  
 42 – Cavidades Longitudinais.

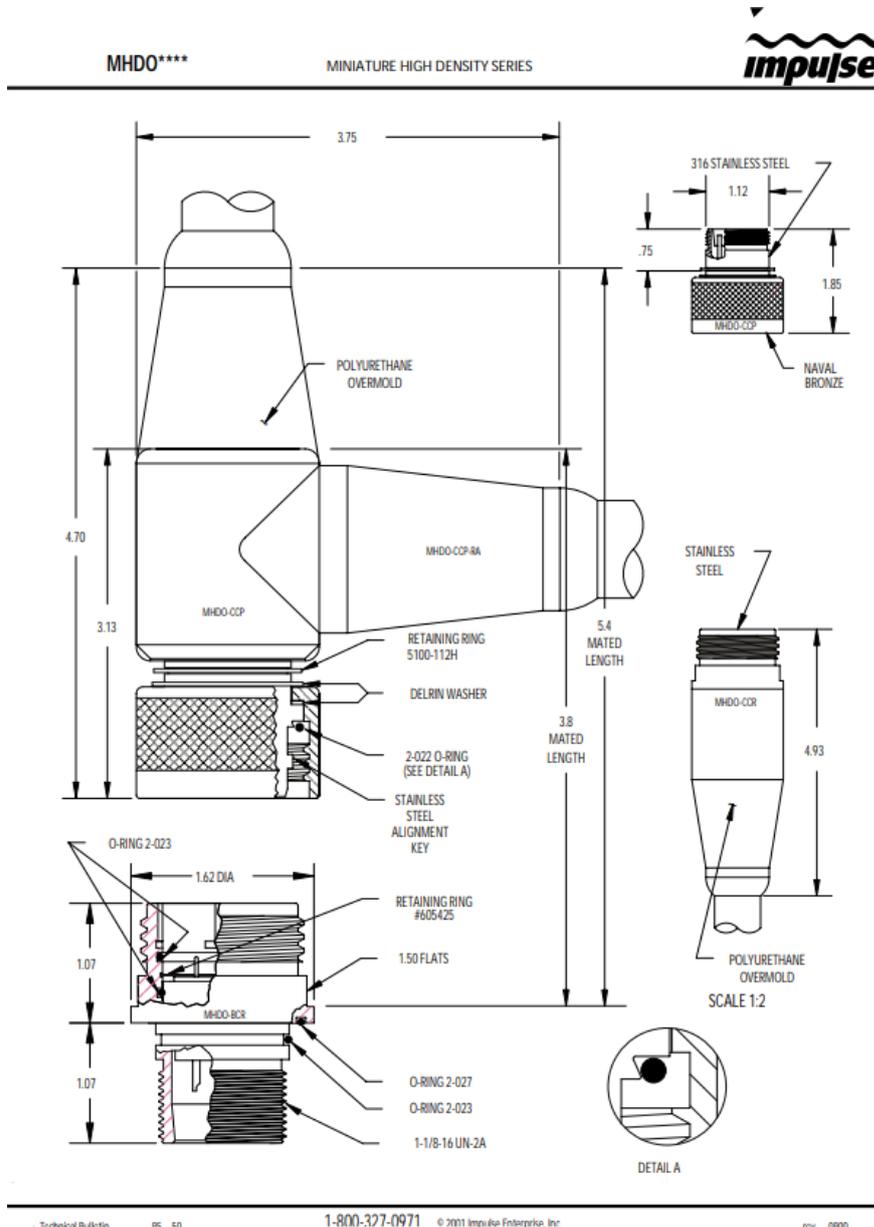


Legenda:  
 18 – Mangueira Externa  
 20 – Cabo flexível  
 22 – Cabos Rígidos  
 24 – Espaçadores  
 28 – Cabos Elétricos  
 34 – Luvas  
 38 – Anéis de Crimpagem

### Referência:

MCGOWAN G. A.; MACCLOCH D. B. **Vibration Isolation Module for Sonar Towed Arrays**. Procurador: Hughes Aircraft Company, Los Angeles, Calif. US4660183 A. Depósito: 22.set 1986. Concessão: 21 abr. 1987.

## ANEXO B – DESENHO DE CONECTOR MHDO.



### Referência:

TELEDYNE MARINE. **Site da Teledyne**, 2016. Impulse Technical Manual Rev. 2016-A. Disponível em: <https://www.teledynemarine.com/en-us/support/SiteAssets/Impulse%20Technical%20Manual%20Rev%202016-A.pdf>. Acesso em: 7out. 2023.

## ANEXO C – ALGORITMO EM PYTHON PARA CÁLCULO DA SENSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CHEGADA DO SINAL DO ARRANJO.

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Limpa a tela

# Limpa as variáveis em uso

# Fecha todas as figuras em aberto

plt.close('all')

# Entradas do sistema

fs = float(input('Digite a Frequência de Sintonia (Hz): '))

f = float(input('Digite a Frequência (Hz): '))

theta0_deg = float(input('Digite o ângulo de direcionamento de feixe: '))

n1 = int(input('Digite o primeiro número de hidrofones para comparação: '))

n2 = int(input('Digite o segundo número de hidrofones para comparação: '))

n3 = int(input('Digite o terceiro número de hidrofones para comparação: '))

# Velocidade do som no mar (m/s)

c = 1500

# Espaçamento entre os hidrofones, considerando a frequência de sintonia (m)

d = c / (2 * fs)
```

```
# Comprimento de onda do sinal acústico (m)
```

```
lambda_ = c / f
```

```
# Theta Final
```

```
thetaf = 180 * np.pi / 180
```

```
# Theta Inicial
```

```
thetai = -180 * np.pi / 180
```

```
# Ângulo de Direcionamento de Feixe
```

```
theta0 = theta0_deg * np.pi / 180
```

```
# Variável Theta a ser incrementada no "for"
```

```
theta = thetai
```

```
# Passo adotado para o Projeto (radianos)
```

```
dtheta = 0.01 * np.pi / 180
```

```
# Número de passos realizados
```

```
ntheta = int((thetaf - thetai) / dtheta)
```

```
# Número de hidrofones
```

```
n = n1
```

# Vetor Graphics vai armazenar todos os valores correspondentes de acordo com o número de passos, e ao final do método numérico vai plotar todos os gráficos necessários.

```
graphics = np.zeros((ntheta, 5))
```

```
for j in range(3):
```

```
    for i in range(ntheta):
```

```
        # Variável u
```

```
        u = np.sin(theta) / lambda_
```

```
        u0 = np.sin(theta0) / lambda_
```

```
        # Função de Diretividade do Array para abertura retangular
```

```
        G = (np.sin(n * np.pi * d * (u - u0))) / (n * np.sin(np.pi * d * (u - u0)))
```

```
        # Armazenando todos os valores a serem plotados no vetor graphics.
```

```
        graphics[i, 0] = theta * 180 / np.pi # guarda theta
```

```
        graphics[i, 1] = theta # guarda theta para o Diagrama Polar
```

```
    if j == 0:
```

```
        graphics[i, 2] = np.abs(G) # guarda Função Diretividade do Array para j=1
```

```
    elif j == 1:
```

```
        graphics[i, 3] = np.abs(G) # guarda Função Diretividade do Array para j=2
```

```
    elif j == 2:
```

```
        graphics[i, 4] = np.abs(G) # guarda Função Diretividade do Array para j=3
```

```
theta += dtheta
```

```
if j == 0:
```

```
    n = n2
```

```
elif j == 1:
```

```
    n = n3
```

```
theta = thetai
```

### # Impressão dos gráficos

```
plt.figure(1)
```

```
plt.plot(graphics[:, 0], graphics[:, 2], '-r', graphics[:, 0], graphics[:, 3], '-b', graphics[:, 0],  
graphics[:, 4], '-g')
```

### # plota theta e Função Diretividade do Array

```
plt.title('Ângulos de chegada e Função Diretividade do Array')
```

```
plt.legend(['fn={n1}', 'fn={n2}', 'fn={n3}'])
```

```
plt.xlabel('Ângulo de chegada')
```

```
plt.ylabel('Função Diretividade do Array')
```

```
plt.grid(True)
```

### # Impressão dos gráficos na forma polar

```
plt.figure(2)
```

```
plt.polar(graphics[:, 1], graphics[:, 2], '-r', graphics[:, 1], graphics[:, 3], '-b', graphics[:, 1],  
graphics[:, 4], '-g')
```

```
# plota theta e Função Diretividade do Array
```

```
plt.legend([f'n={n1}', f'n={n2}', f'n={n3}'])
```

```
plt.title('Ângulo de chegada e Função Diretividade do Array')
```

```
# Imprimindo informações relevantes
```

```
print(f'Comprimento de onda: {lambda_:.3f}')
```

```
print(f'Distância entre os hidrofones: {d:.3f}')
```

```
plt.show()
```

### **Referência:**

CALDEIRA, Antônio Walker Sibanto. Desenvolvimento de um array de hidrofones linear rebocado para experimento no mar. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2017.