

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

**ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO DE UM SONAR REBOCADO EM  
DETRIMENTO DE CONDIÇÕES AMBIENTAIS**



1ºTen LUCAS RODRIGUES SERAINE

CIAA  
Rio de Janeiro - RJ  
2023

1ºTen LUCAS RODRIGUES SERAINE

**ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO DE UM SONAR REBOCADO EM  
DETRIMENTO DE CONDIÇÕES AMBIENTAIS**

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

Orientadores:

Prof. José Manoel de Seixas, Dsc.

CT Luís Paulo Albuquerque Guedes

CIAA  
Rio de Janeiro - RJ  
2023

1ºTen LUCAS RODRIGUES SERAINE

**ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO DE UM SONAR REBOCADO EM  
DETRIMENTO DE CONDIÇÕES AMBIENTAIS**

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

Aprovada em: 01 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:



---

Prof. José Manoel de Seixas, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



---

Capitão de Mar e Guerra (RM1) Henrique Luiz Neto, M.Sc.  
Centro de Instrução Almirante Alexandrino (CIAA)



---

Capitão de Corveta Guilherme Ferreira Murrel Liali  
Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha (CGAEM)



---

Capitão de Corveta Daniel Gama de Sousa Martins  
Centro de Instrução Almirante Alexandrino (CIAA)

CIAA  
Rio de Janeiro - RJ  
2023

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar ao longo deste caminho e por me dar a força necessária para superar os desafios que encontrei. Sua orientação divina e bênçãos foram fundamentais para minha jornada.

À minha amada esposa, Rafaela, pela compreensão e apoio inabaláveis. Obrigado por estar ao meu lado, compreendendo as noites em que me ausentei estudando e as vezes em que precisei me concentrar intensamente nesse projeto. Só ela sabe o que passamos nessas últimas semanas.

Aos meus pais, Décio e Selma, agradeço por todo o amor incondicional, apoio e paciência que me dedicaram ao longo da vida. Sem vocês, essa conquista não seria possível. Seus sacrifícios e incentivos sempre estiveram presentes, e sou imensamente grato por isso.

Aos meus estimados professores, Prof. Parente e Prof. Natanael, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, moldando meu pensamento e ampliando minha visão de mundo, minha sincera gratidão. Em especial, o Prof. Natanel, suas aulas, conselhos e críticas construtivas foram inestimáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus dedicados orientadores, Prof. Seixas e CT Albuquerque, que me guiaram com paciência e expertise ao longo deste processo, minha profunda apreciação. Suas orientações, feedbacks e apoio contínuo foram cruciais para a conclusão deste trabalho. Ao Prof. Seixas, que abriu minha mente com seus Processos Estocásticos, muito obrigado.

E ao coordenador, CC (RM1-EN) Carlos Martins, que nos liderou de forma brilhante e ótima convivência durante todo o ano, meus agradecimentos.

Neste momento de realização, quero expressar minha gratidão a todos que fizeram parte desta jornada, como meus companheiros de sala de aula. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental na minha trajetória acadêmica, e sou profundamente grato por isso.

# ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO DE UM SONAR REBOCADO EM DETRIMENTO DE CONDIÇÕES AMBIENTAIS

## RESUMO

Em virtude da relevância do tema e das análises, considerações, pesquisas e projetos que se erigem dos intensos debates que permeiam gradativamente o domínio público e o privado, sobretudo quanto à supervisão das plataformas de petróleo, à gestão dos recursos naturais no interior das águas jurisdicionais brasileiras, e à contraposição de ameaças externas, urge a necessidade de se desenvolver tecnologias capazes de assegurar a soberania do país. Quanto à garantia do domínio do espaço marítimo brasileiro, a Marinha do Brasil, com o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), estimulasse a Base Industrial de Defesa (BID) a desenvolverem ou aperfeiçoarem recursos e equipamentos com elevado valor tecnológico agregado, em prol da obtenção de informações em tempo real, com o fim de subsidiar a tomada de decisão por parte das autoridades competentes, a exemplo dos sonares. Os sonares apresentaram uma evolução substancial, com um grande desenvolvimento como o sonar rebocado passivo chamado *Towed Array Sonar*. Em que pese haver problemas inerentes às informações subaquáticas, como os fatores que afetam a propagação das ondas acústicas no meio, tal como a atenuação do sinal ao longo do percurso, a reduzida velocidade do som, condições ambientais, este trabalho analisou as características do arrasto hidrodinâmico de um sonar rebocado de maneira a contribuir futuramente para um projeto de sonar rebocado. Concluiu-se que o sonar rebocado desempenha um papel crucial na defesa e na pesquisa científica. À medida que avançamos na tecnologia acústica submarina, podemos esperar melhorias na eficácia das operações submarinas, beneficiando a segurança nacional e o conhecimento nessa área.

**Palavras-chave:** Amazônia Azul; Acústica; Sonar; *Towed Array Sonar*; Arrasto.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AJB - Águas Jurisdicionais Brasileiras

CNDUM - Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar

ZEE - Zona Econômica Exclusiva

PROSUB - Programa de Desenvolvimento de Submarinos

TAS – *Towed Array Sonar*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>07</b>
<b>1.1 MOTIVAÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 CONTEXTO HISTÓRICO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 CARACTERÍSTICAS INERENTS À PROPAGAÇÃO DE ONDAS         SONORAS EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 RUÍDO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 SISTEMA SONAR .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1 Equação Sonar .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2 Sistema Sonar Ativo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.3 Sistema Sonar Passivo.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.1 Análise LOFAR .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.2 Introdução aos Processos Estocásticos.....</b>	<b>24</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO .....</b>	<b>27</b>
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>34</b>

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

O termo “Amazônia Azul”, cujo conceito subjacente atualmente, permeia os domínios da Ciência, da Tecnologia e da Inovação, foi utilizado primeiramente pelo Almirante de Esquadra Roberto de Guimarães Carvalho em 2004, no período em que exercia a função de Comandante da Marinha do Brasil, devido similaridades encontradas entre esse território marítimo e o território amazônico, sobretudo no que se refere aos recursos naturais à relevância estratégica para o Brasil (MARINHA DO BRASIL, 2023).

É importante salientar que a Amazônia Azul, conceitualmente, trata-se de um território marítimo com aproximadamente 5,7 milhões de km<sup>2</sup>, referente à soma da Plataforma Continental (PC) do Brasil com a Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

A Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM) define a plataforma continental como um prolongamento do território submerso, legitimando a soberania do Estado costeiro para fins de exploração e uso dos recursos naturais nela existentes, não valendo para o espaço aéreo e às águas marinhas da PC e sim ao leito e ao subsolo. Já a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) refere-se a uma faixa que se estende das doze às duzentas milhas marítimas, sobre a qual o Brasil detém a exclusividade para a utilização, conservação e gestão ambiental dos recursos naturais do mar territorial, com vistas à exploração e ao aproveitamento da área para fins econômicos (AMN, 2023).

Constata-se que à medida que o emprego de tecnologias disruptivas permitiu o mapeamento cada vez mais preciso do fundo do mar, novas riquezas oceânicas foram sendo descobertas, exigindo o desenvolvimento e o emprego de mecanismos e instrumentos tecnológicos capazes de se contraporem a ameaças que poderiam violar a soberania nacional e a integridade dos bens naturais, sobretudo o Petróleo e o Gás Natural.

Nesse contexto, faz-se necessário ressaltar que o Brasil já adentrou o século XX com elevados índices de crescimento no setor petrolífero, e, em 2006, tornou-se autossuficiente em Petróleo. Estima-se que de 1991 a 2011, a Petrobrás, empresa estatal brasileira de capital aberto, tenha tido um crescimento de 164% nas suas reservas (PEREIRA; CHAVES NETO, 2017).

A autossuficiência na produção de petróleo foi alcançada principalmente devido a inovações tecnológicas empregadas na exploração e na operação em águas profundas, que viabilizaram inúmeras descobertas na plataforma oceânica continental. Segundo o Diretor de

Exploração e Produção, Fernando Borges, durante o Brazil Energy Meeting, com a dívida da Petrobrás sob controle, a empresa conseguiu aumentar em 24% os seus investimentos, somando uma cifra de aproximadamente US\$ 68 bilhões no período de 2022 a 2026. Desse montante, cerca de US\$ 60 bilhões estão atrelados ao setor de Exploração e Produção (E&P) de Petróleo e Gás Natural, com foco em campos de águas profundas e ultraprofundas. Segundo o Diretor, serão catorze novas plataformas no referido período, sendo que doze já estão em construção (PETROBRAS, 2022).

Nesse contexto, ressalta-se que a região da Amazônia Azul é responsável pela extração de cerca de 85% do petróleo, 75% do gás natural e 45% de todo o pescado produzido no país, além de concentrar inúmeros recursos naturais e uma vasta biodiversidade marinha ainda pendente de exploração (MARINHA DO BRASIL, 2022).

Embora seja irrefutável a contribuição econômica para o país, as atividades operacionais atreladas à indústria de produção de gás e petróleo são complexas e desafiadoras. Para tanto, faz-se necessária uma infraestrutura robusta de vigilância e de monitoramento, com o objetivo de superar as adversidades típicas que surgem com o advento das operações em ambiente subaquático (RIBEIRO, 2016).

É inquestionável que a Amazônia Azul se reveste de singular importância estratégica para o Brasil, além de ser uma área geográfica que contribui diretamente para o desenvolvimento das vertentes econômica, científica e ambiental, por meio do estímulo ao aprimoramento tecnológico contínuo e à integração de esforços de diversos atores da sociedade, tais como instituições privadas, organizações não governamentais, etc (MARINHA DO BRASIL, 2022).

Dentre esses atores, a Marinha de Guerra, como principal componente da estrutura da Defesa Nacional, tem papel fundamental no desenvolvimento tecnológico que contribui não só para a exploração sustentável dos recursos naturais provenientes da Amazônia Azul, como também para a manutenção das atividades econômicas marítimas, através do emprego de meios navais e de sistemas de vigilância que buscam monitorar e reprimir os ilícitos cometidos nas águas jurisdicionais brasileiras (MATIAS, 2009).

Nesse contexto, surge a necessidade incrementar o poder naval brasileiro, por meio de tecnologias capazes de otimizar a detecção, identificação e classificação de agentes violadores de normas nacionais e internacionais. Dentre essas tecnologias, ressalta-se a importância do emprego de sonar rebocado para a identificação e análise das informações de ameaças que possam, de alguma forma, comprometer a soberania e a integridade dos recursos naturais do

país. Pois, o princípio básico desse sistema é a emissão e recepção de sinais acústicos com o objetivo de detectar objetos debaixo d'água e determinar sua localização e características.

Embora o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz) seja uma proposta que se mostra viável, faz-se necessário ressaltar que o emprego de sonar rebocado para ampliar o sistema de vigilância proposto poderá significar tempestividade e efetividade na tomada de decisão por parte da autoridade competente, em especial para o Comando e Controle (C2).

Além disso, vislumbra-se, a partir das informações coletadas pelo sonar rebocado, a possibilidade de integração com várias tecnologias de monitoramento marítimo via satélite, como o Sistema de Monitoramento Marítimo de Apoio às atividades de Petróleo (SIMMAP), o Sistema de Identificação e Acompanhamento de Navios a Longa Distância (LRIT), o Sistema de Informação sobre Tráfego Marítimo (SISTRAM), Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite (PREPS) e futuramente com informações obtidas pelos submarinos brasileiros do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e pelos navios do Programa Fragatas "Classe Tamandaré" (Revista Marítima Brasileira, 2020).

O PROSUB consiste na construção de quatro submarinos convencionais: o SBR Riachuelo que já se encontra empregado em operações, o SBR Humaitá que se encontra em fase de testes finais no mar, o SBR Tonelero com previsão de lançamento ao mar ainda este ano e o SBR Angostura que ainda está em fase de produção. Além disso, o Brasil está construindo seu primeiro submarino nuclear, o SN Álvaro Alberto, que está em processo de construção e tem previsão de ser comissionado em 2034. Com esse sistema avançado baseado no controle e proteção capaz de aumentar a presença de meios e o processamento de dados nos locais mais críticos, como a faixa litorânea que vai de Santos a Vitória e área da foz do rio Amazonas, oferece mobilidade para abranger regiões mais afastadas da Amazônia Azul. Nesse sistema, submarinos são considerados recursos de defesa proativa em nossas águas, principalmente devido ao seu potencial dissuasório, proporcionado por sua mobilidade estratégica (Revista Marítima Brasileira, 2020).

O Programa Fragatas "Classe Tamandaré" da Marinha do Brasil é um projeto estratégico que visa a construção de quatro navios militares de alta tecnologia. Este programa tem diversos objetivos, incluindo a produção com alto conteúdo local, a transferência de tecnologia, a gestão do ciclo de vida das embarcações e a sustentabilidade da indústria naval brasileira. A aquisição das fragatas também terá impactos econômicos, com a geração de empregos diretos e indiretos (MARINHA DO BRASIL, 2023).

As fragatas serão versáteis e capazes de enfrentar diversas ameaças, sendo utilizadas na proteção do tráfego marítimo, defesa do litoral, patrulha das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) e outras missões. O projeto detalhado começou em 2021, com a entrega das embarcações prevista para ocorrer entre 2025 e 2028, representando um investimento de cerca de US\$ 2 bilhões (MARINHA DO BRASIL, 2023).

Diante disso, o emprego de sonares rebocados atenderá de forma eficiente a aquisição e controle das informações necessárias à tomada de decisão em nível estratégico e tático, com o fim de, dentre outros objetivos, detectar, identificar e neutralizar as possíveis ameaças que adentrem as AJB. Entretanto, a obtenção de um *Towed Array Sonar* (TAS) pela Marinha do Brasil é demasiadamente custoso e por isso uma solução para satisfazer essa demanda seria desenvolver um protótipo com as necessidades específicas para nossa Marinha.

Um sonar rebocado como o nome já diz, ele é rebocado de maneira que esse arrasto gera um ruído em todo o *array*, afetando diretamente a qualidade dos dados acústicos coletados. Um possível protótipo se dividiria em 3 partes: mecânica, eletrônica e processamento de sinais. Este ruído impacta as 3 áreas, mas principalmente no processamento de sinais, tendo em vista que influencia diretamente a eficácia na detecção e a qualidade dos dados, onde necessitam ser precisas e confiáveis. Com isso, é evidente que a análise do ruído de arrasto é de suma importância não só na concepção de um TAS, como também nas informações geradas por ele.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O sistema de sonar passivo rebocado é o principal dispositivo de detecção de submarinos militares. Ele consiste em um *array* de hidrofones combinados com um avançado sistema de processamento de sinais. Este equipamento é montado na popa do navio, permanecendo recolhido quando não está em uso. Quando a embarcação se encontra em uma área potencialmente hostil, com a suspeita de presença de submarinos inimigos, o *array* de hidrofones é lançado na água, dando início à busca submarina.

O ruído de arrasto, resultado da interação do TAS com o ambiente marinho, compromete significativamente a clareza e a precisão das detecções. Em um conflito militar, o ambiente subaquático se constitui de campo de batalha de elevada complexidade, no qual as correntes, temperatura, salinidade e os próprios seres marinhos geram ruídos que interferem no sinal que se busca analisar. Compreender e minimizar o ruído de arrasto é fundamental

para aprimorar a eficácia do sonar e, assim, elucidar sobre as possibilidades uma maior clareza precisão nas detecções.

A análise do ruído de arrasto é a chave para essa missão. Ao analisarem as complexas interações entre o sonar e o meio ambiente marinho, torna-se possível o desenvolvimento de estratégias para atenuar esses efeitos adversos. Isso possibilitará a melhora na capacidade de audição, o aumento na capacidade de detecção e a expansão das fronteiras na exploração oceânica.

Além disso, até o momento, não existem trabalhos que abordem de maneira abrangente o desenvolvimento de sistemas sonares rebocados no Brasil, com uma análise sobre as características desse dispositivo, tampouco sobre ruído de arrasto.

Entretanto, a motivação central deste trabalho é visualizar e sintetizar a prática do aprendizado que os alunos sempre questionam quando são apresentados a novos conhecimentos e informações. Por meio desse estudo, foi possível analisar e validar a capacidade técnica e profissional adquirida durante o Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Acústica, bem como a expertise desenvolvida ao longo tempo vivenciado a bordo de navios.

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta seção se propõe a detalhar o objetivo geral e os específicos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral de apresentar, por meio de uma análise comparativa qualitativa e quantitativa, as vantagens do emprego do sonar rebocado, tanto pelos meios que realizam Patrulha Naval como pelos submarinos, em detrimento do sonar de casco, com o fim de aprofundar e de estruturar os conceitos relacionados ao ruído de arrasto e às estratégias para sua mitigação eficaz.

De forma específica, pode-se identificar a caracterização do ruído de arrasto, com desenvolvimento de métodos e a particularização deste ruído em diferentes condições e ambientes marinhos, identificando padrões temporais e espaciais nas interferências causadas por ele.

Este trabalho poderá contribuir à Marinha do Brasil, primeiramente, na compreensão mais profunda e eficaz da descrição do ruído de arrasto no contexto do *Towed Array Sonar*, alavancando avanços tecnológicos que beneficiem não apenas operações militares, mas também a exploração científica. Em um segundo momento, esse estudo auxiliará na

concepção de um TAS nacional, assim como na criação de um procedimento operacional para o seu uso, tornando viável o emprego de sonares rebocados em atividades navais de proteção das AJB, que são de fundamental importância para manter a defesa de nossa costa marítima e a nossa soberania nacional.

## CAPÍTULO 2

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo conceituar as principais características relacionadas às tecnologias que envolvem a propagação de ondas sonoras e a transmissão de dados em meio subaquático, perpassando os aspectos técnicos de funcionamento e de processamento de informações acústicas e os desafios inerentes às condições ambientais do meio submarino.

Para tanto, o capítulo será introduzido pelo contexto histórico da evolução da acústica submarina, desde o princípio até o período pós-guerra. Na seção 2.2, servirá como base de conhecimento teórico, apresentando as principais características e limitações da propagação do som em relação às condições do mar. A seção 2.3, abordará sobre os ruídos presentes no ambiente marinho. Na seção 2.4, apresentar-se-á o Sistema Sonar, formulação da equação sonar e as variadas iterações com seus parâmetros. A tecnologia do sonar, em especial o rebocado, juntamente com as principais condições ambientais que podem justificar seu emprego e, por fim, na seção 2.5 a evolução do processamento de sinais no contexto da tecnologia sonar.

#### 2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

A origem e as descobertas científicas relacionadas à acústica submarina, especificamente ao uso do sonar, têm sua importância fundamental na 2ª Guerra Mundial, mas a história desse campo remonta a períodos anteriores.

De acordo com (Clay & Medwin, 1977), em 1490, Leonardo da Vinci propôs pela primeira vez que os navios poderiam ser detectados ouvindo-se o barulho que eles irradiam em água. Ele demonstrou que a propagação do som no oceano poderia ser usada para a detecção ou acompanhamento de objetos submersos. É dele a famosa frase: “...se você parar seu navio e mergulhar a ponta de um longo tubo n’água e colocar seu ouvido na outra extremidade, você ouvirá navios a grandes distâncias...”.

Ainda conforme os autores, o parâmetro acústico mais importante do oceano é a velocidade do som, e sua medição mais antiga foi provavelmente o trabalho de Colladon e Sturn (1827) realizado em novembro de 1826 no Lago Genebra, na Suíça. A Figura 2.1 ilustra o experimento, no qual um sino mergulhado foi atingido simultaneamente com um flash de

pólvora. Ao cronometrar o intervalo entre o flash e a chegada do som, eles calcularam a velocidade do som. O valor encontrado foi 1435 m/s, mas logo se percebeu que a velocidade na água salgada é um pouco maior que este valor, e como veremos no decorrer do trabalho, a temperatura da água é um parâmetro ainda mais importante.

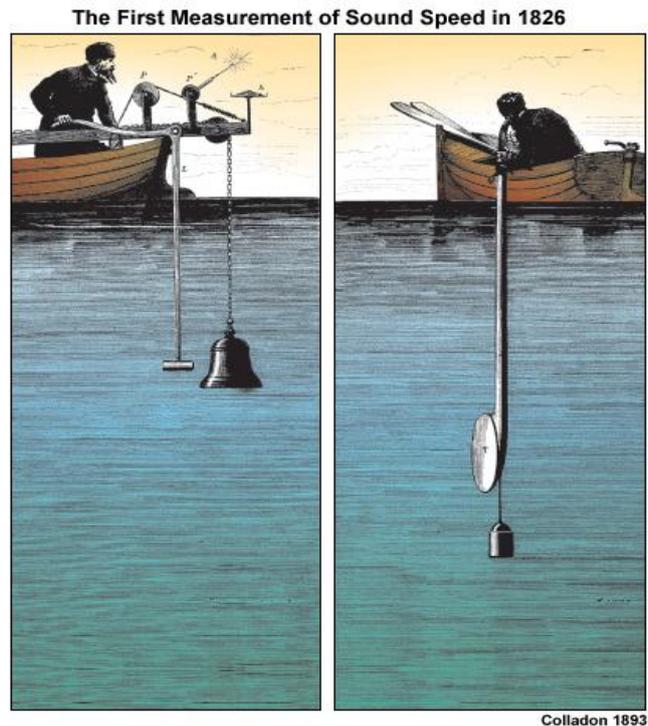


Figura 2.1: Experimento de Colladon e Sturn. Fonte: Clay & Medwin (1977).

Porém somente em 1912, quando ocorreu a famosa colisão do navio Titanic com um iceberg e a conseqüente perda de centenas de vidas, o homem despertou para o uso do som na detecção no fundo do mar (Clay & Medwin, 1977).

(Clay & Medwin, 1977) afirmam que a Primeira Guerra Mundial estimulou a necessidade urgente de um equipamento que detectasse submarinos. Foi em 1916 Paul Langevin inventou o primeiro SONAR (*Sound Navigation And Recording*, navegação e gravação por som) chamado de “eco local para detectar submarinos”, usando as propriedades piezoelétricas do quartzo. (Leo, 2007) define que em 1880 os irmãos Curies identificaram um fenômeno notável: certos materiais podem produzir cargas elétricas em sua superfície quando submetidos a pressão ou tensão mecânica. Esse fenômeno, conhecido como efeito piezoelétrico, demonstrou ser completamente reversível, uma vez que a aplicação de um campo elétrico é capaz de provocar a deformação do material.

Entretanto, após a 1ª Guerra Mundial, nenhuma atenção foi dada à propagação ou à velocidade do som. O foco estava na área de “hardware”. No entanto, com o a evolução da eletrônica, constataram-se diferentes alcances em um mesmo local. Isso demonstrou que esses dados não eram devido a erros do equipamento ou dos observadores, mas sim às características do meio (Clay & Medwin, 1977).

Após inúmeras medições de laboratório e de campo, revelaram que a velocidade do som sofre influência de 3 fatores: temperatura, salinidade e pressão (profundidade). Uma fórmula simplificada para a velocidade em m/s foi fornecida por Medwin (1975) pela Equação 2.1:

$$c = 1492.9 + 3(t - 10)6 \times 10^{-3}(t - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(t - 18)^2 + 1.2(s - 35) - 10^{-2}(t - 18)(s - 35 + h/61) \quad (2.1)$$

Onde:

$c$  = velocidade do som (m/s)

$t$  = temperatura (°C)

$s$  = salinidade (ppm)

$h$  = profundidade (m)

Com o desenvolvimento da eletrônica, todos esses sensores acústicos tornaram-se mais eficazes. Com o crescente conhecimento do processamento de sinais, maiores alcances podem ser obtidos e alvos menores podem ser identificados. Isso facilita que o operador identifique um alvo em um curto espaço de tempo.

A comunicação acústica subaquática implica enviar e receber mensagens sonoras abaixo da água. Devido às várias aplicações práticas em atividades militares, comerciais, recreativas, educacionais e científicas, é imperativo que este campo mantenha seu lugar no centro das atenções de muitas empresas de pesquisa (especialmente indústrias de petróleo e gás, empresas de instrumentação submarina e pesca) e público universitário. A comunicação é extremamente importante em todas as atividades submarinas, pois estabelece a transferência de dados entre dois indivíduos. Para cada entidade que utiliza um sistema de comunicação acústica submarina, obter os dados corretos e completos no momento certo (o mais rápido possível) é absolutamente vital para sua busca, seja esta navegação, monitoramento, atividades militares, defesa ou outras (LEÃO, 2015).

Cumprer ressaltar que os primeiros projetos que visavam a tentativa de estabelecer comunicações subaquáticas utilizavam-se de ondas eletromagnéticas de radiofrequência (LEÃO, 2015).

Através desses primeiros ensaios, que datam do final do século XIX, sendo reanalisados durante a década de 1970 (PALMEIRO; MARTIN; CROWTHER, 2011) constatou-se que sinais eletromagnéticos não eram apropriados para viabilizar a transmissão de dados em meio subaquático (GUSSEN, 2016).

As ondas eletromagnéticas se caracterizam principalmente por quatro parâmetros, quais sejam: permeabilidade, permissividade, condutividade e volume de densidade de carga. Portanto, em um ambiente subaquático, caracterizado pela alta permissividade e condutividade elétrica do meio, tem-se que a propagação eletromagnética fica severamente prejudicada. Além disso, a atenuação também se mostra em nível mais elevado se comparada com a propagação da onda no ar (MACHADO, 2016).

Como consequência dessa análise preliminar, chegou-se a conclusão de que as comunicações subaquáticas através de sinais eletromagnéticos se restringem a distâncias de curto alcance (<100m), com velocidades relativamente altas (MACHADO, 2016). Se comparadas com as ondas eletromagnéticas, as ondas sonoras detêm a capacidade de ultrapassarem a coluna de água e de se propagarem pelo meio de forma muito mais eficiente, tornando-se, dessa forma, a melhor opção para se obter informações sobre alvos submersos (ROTTA, 2019).

Assim, este trabalho parte do pressuposto que, em meio subaquático, a análise ou o estudo de ondas eletromagnéticas restam-se prejudicadas. Dessa forma, e com base nas considerações iniciais até aqui expostas, serão apresentadas as características e os pressupostos teóricos inerentes à propagação de ondas sonoras em ambiente subaquático.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS INERENTES À PROPAGAÇÃO DE ONDAS SONORAS EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Uma onda correspondente a uma perturbação simples é denominada pulso. Uma sucessão regular de pulsos iguais produz uma onda periódica. As principais características de uma onda periódica são Período, Frequência, Amplitude e Comprimento de onda. O Período (T) é o tempo de uma oscilação completa de qualquer ponto da onda; a Frequência (f) é o número de vibrações em um ponto da corda por unidade de tempo; Amplitude (A) é o maior

valor de alongação da onda e o Comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a menor distância entre dois pontos que tem sempre mesmo sentido de movimento (HALLIDAY, 2014).

Segundo a doutrina científica especializada, tem-se que a teoria ondulatória classifica o som como uma espécie de onda — perturbação que se propaga transportando energia, sem envolver transporte de matéria — Mecânica, Longitudinal, Tridimensional e Periódica (NASCIMENTO; GOBARA, 2016).

As ondas sonoras são ondas mecânicas porque transmitem energia através da colisão das moléculas do meio, uma contra as outras. Dessa forma, o som pode ser caracterizado por sucessivas compressões e rarefações do ambiente em que se propaga, tendo como origem uma fonte sonora (GERGES, 1992).

A propagação do som no mar é afetada por diversos fatores, como absorção por perda em forma de calor, refração, devido a gradientes de velocidade, deflexão e reverberação por partículas suspensas, dispersão conforme o som se afasta da fonte e reflexão causadas pela superfície e fundo. Existem modelos de propagação para prever estas condições. A velocidade do som no mar é um fator crucial na elaboração desses modelos, já que seu valor absoluto e sua variação com a profundidade são fundamentais para o cálculo da propagação do som. O conhecimento do perfil da velocidade do som (PVS ou SVP, *Sound Velocity Profile*), é importante para determinar o tipo de sonar a ser utilizado e seu modo de operação, como a profundidade adequada para colocar um arranjo rebocado ou um sonar de profundidade variável (VDS) e a direção dos feixes de um sonar montado no casco para explorar fenômenos de propagação, como reflexões na superfície e no fundo ou zonas de convergência (WAITE, 2002).

Os perfis de velocidade do som (PVS) são gráficos da velocidade do som pela profundidade. O PVS depende de diversos fatores como localização, estação do ano, hora do dia e do clima. Na maioria dos locais, a salinidade pode ser considerada constante em 35 partes por milhão (ppm), mas alguns ambientes têm salinidades substancialmente diferentes (WAITE, 2002).

A temperatura varia altamente com a profundidade e esta relação é eventualmente difícil de medir ou prever. Geralmente é medido por um batitermógrafo (mede temperatura x profundidade). A velocidade do som aumenta em função da temperatura e da profundidade. Quando a água próxima da superfície é mais quente do que em maiores profundidades, existem duas tendências à medida que a profundidade aumenta: a velocidade do som diminui com a queda da temperatura ou a velocidade do som aumenta com o aumento da pressão. O

resultado dessas tendências opostas é produzir PVS que variam abundantemente dentro das primeiras centenas de metros de profundidade, além de serem influenciados por mudanças diurnas e pela mistura da camada superficial pelo vento e ondas. A Figura 2.2 mostra um PVS característico em alto mar dividido em quatro camadas principais (WAITE, 2002):

- Camada superficial: uma camada de água isotérmica misturada pela ação do vento sobre a superfície do mar. O som tende a ficar preso nesta camada por reflexões na superfície, reflexões no fundo e refrações ascendentes.
- Termoclina sazonal: a temperatura diminui com a profundidade. Durante o verão e outono, a termoclina é forte e identificável. Durante o inverno e a primavera, é fraco e se funde com a camada superficial.
- Termoclina principal: pouco afetada pelas estações do ano. Embora a pressão aumente com a profundidade, o efeito resultante das mudanças de temperatura e pressão é a redução da velocidade do som ao longo desta camada.
- Camada isotérmica profunda: temperatura constante de cerca de 4°C até o fundo. A velocidade do som aumenta com o aumento da pressão. A tendência é mostrada na curva tracejada da Figura 2.2 para uma latitude de cerca de 60°N.

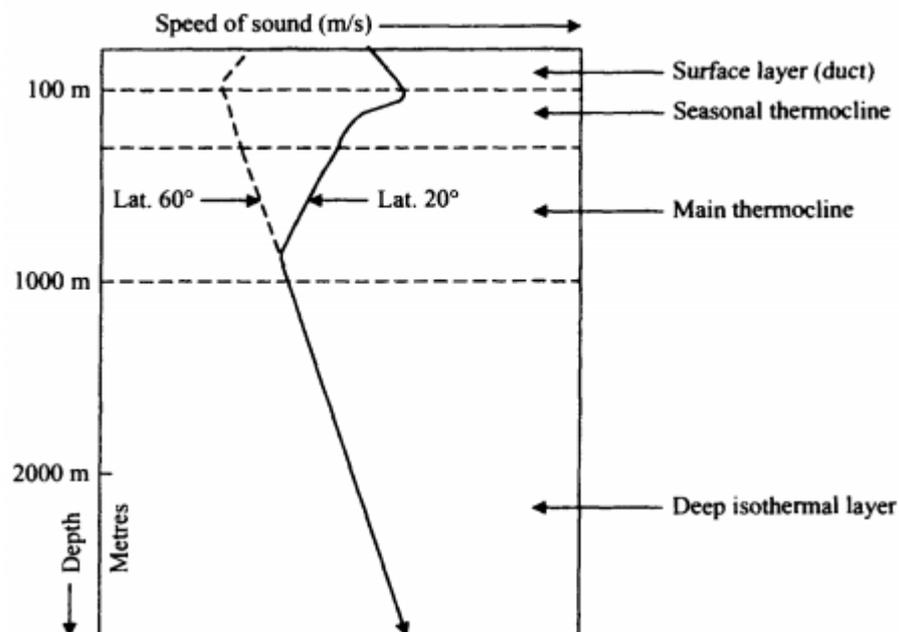


Figura 2.2 - Perfil de Velocidade do Som na água. Fonte: WAITE, 2002.

## 2.3 RUÍDO

Neste item, este trabalho apresentará as principais fontes geradoras de ruídos em um ambiente subaquático. A análise dos ruídos é de suma importância para a detecção e identificação por parte dos sonares passivos e, em um contexto militar, para a neutralização de possíveis ameaças que possam comprometer a soberania de um país. Os ruídos nos oceanos são divididos em dois tipos de fontes: naturais e artificiais. Os naturais são divididos em dois grupos chamados geofonia (ondas, ventos, terremotos,...) e biofonia (basicamente emissões de animais marinhos). Entretanto, as fontes artificiais, definidas como antropofonia, são geradas por diversos fatores como exploração sísmica, sonares, plataformas e principalmente por motores de embarcações.

Assim, tem-se que as principais fontes de ruídos emitidos por embarcações são (SILVA, 2007):

- Sistema de propulsão: inclui as máquinas, as engrenagens redutoras, o eixo principal, os mancais e os acessórios;
- Hélice: embora seja parte integrante do sistema propulsor, é analisado separadamente, por causa da diferença significativa do sinal acústico por ele gerado em relação aos sinais gerados pelas outras partes; e
- Máquinas auxiliares: estão incluídos os sistemas elétricos e os mecânicos não relacionados ao sistema de propulsão, abrangendo: ar condicionado, geradores elétricos e bombas.

Entretanto, como mencionado o ruído produzido pelo hélice de um navio possui uma diferença relevante e é composto por duas fontes principais: cavitação, que ocorre durante o movimento do hélice, e ressonância da vibração do casco da embarcação. (DE MOURA JUNIOR, 2018) define que a cavitação surge quando o hélice gira na água, criando áreas de alta e baixa pressão. Se essas áreas atingirem uma pressão suficientemente alta para romper a resistência da água, bolhas de ar (ou cavidades) se formam e, ao colapsar, emitem pulsos sonoros na água. Esse tipo de ruído é caracterizado por frequências elevadas e é modulado em amplitude devido as batidas do hélice, que ocorrem periodicamente na frequência de rotação do eixo propulsor. A intensidade desse ruído varia de acordo com o número de pás do hélice, o que é útil na identificação dos sons emitidos por navios de interesse, já que cada embarcação é projetada com um número específico de hélices e pás.

## 2.4 SISTEMA SONAR

Este capítulo tem como objetivo a apresentação do assunto significativo envolvido no trabalho. Será realizada uma breve abordagem sobre Sistemas de sonar, contemplando sonares ativos e passivos.

Existem diversos tipos de sistemas sonar, projetados para aplicações militares e civis. Dentre estas aplicações civis, a exploração de recursos marinhos e o monitoramento de dutos submarinos, desempenham papel crucial na indústria de óleo e gás. No entanto, a abordagem será sobre seu uso militar. O sonar ativo é comum no casco de navios para caça de submarinos. Além disso, existe o sonar ativo rebocado, que tem a finalidade de explorar diferentes profundidades e, conseqüentemente, os dutos de melhor propagação do som na água. A principal vantagem deste tipo de sonar é restringir o ruído fornecido pelo próprio navio.

O outro tipo de sistema sonar é o passivo, utilizado principalmente em submarinos que têm como principal objetivo se manter ocultos, bem como os sonares passivos rebocados (*Towed Array Sonar*), o qual é o foco do trabalho.

### 2.4.1 Equação Sonar

A equação sonar é uma ferramenta matemática utilizada para estimar as amplitudes do sinal e do ruído presentes nos transdutores do sistema sonar. Ela leva em consideração diversos fatores que afetam a propagação do som no meio aquático, como o nível da fonte emissora de sinal, o espalhamento do som, absorção sonora, as perdas por reflexão, o nível de ruído ambiente e as características do receptor. A SNR (razão sinal-ruído) é um parâmetro importante para avaliar a eficiência de um sistema sonar, pois determina se o sinal de interesse não terá amplitude suficiente para se diferenciar do ruído e a detecção será ineficiente (DE MOURA JUNIOR, 2018).

### 2.4.2 Sistema Sonar Ativo

No sonar ativo ocorre a transmissão de um pulso sonoro, quando refletido em alguma superfície pelo caminho da onda recebe um eco. A equação sonar para sistemas de sonares ativos é dada por (DE MOURA JUNIOR, 2018):

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL - AG) \quad (2.2)$$

Onde:

SL (Source Level) = potência de sinal emitida pelo sistema de emissor, medida em dB;

TL (Transmission Loss) = perda de potência do sinal causada pelo meio, medida em dB;

TS (Target Strength) = potência de reflexão do sinal emitido após atingir o alvo de interesse, medida em dB;

NL (Noise Level) = nível de ruído do fundo, soma de todas as fontes sonoras que não são de interesse, medida em dB; e

AG (Array Gain) = ganho do sistema de recepção, medido em dB.

### 2.4.3 Sistema Sonar Passivo

Diferentemente do sonar ativo, o sonar passivo apenas “recebe” o som gerado por qualquer fonte e o analisa. A equação sonar para sistemas passivos é muito semelhante, apenas se diferencia em relação a não considerar o sinal do eco (TS), tendo em vista que não ocorre uma transmissão de pulso como no sonar ativo. Por isso, a grande dificuldade de detecção e, mais ainda, de classificação, tendo em vista que todo ruído adquirido por esse tipo de sonar pode ser um sinal de interesse. Logo, a Equação 2.3 é dada por (DE MOURA JUNIOR, 2018):

$$SNR = SL - TL - (NL - AG) \quad (2.3)$$

Diante disso, um sonar passivo rebocado é o mais indicado para detecção de alvos submarinos por dois motivos (GOLTZ, 2019):

- O sonar rebocado tem seus hidrofones colocados a uma distância maior do que outros sonares fixados diretamente no casco. Por isso, o ruído gerado pelo próprio submarino ou navio, chamado ruído próprio, interfere menos no sinal recebido pelo sonar rebocado. Já os sonares fixados no casco estão mais próximos do ruído gerado pela propulsão e máquinas auxiliares, além de sofrerem interferência do arrasto hidrodinâmico do casco e de eventuais cavitações e saliências do casco e hélices; e
- Possui um tamanho maior, da ordem de centenas de metros, o que lhe confere uma maior diretividade em frequências maiores do que outros sonares instalados no submarino. Portanto, é capaz de detectar contatos a distâncias muito maiores do que esses outros sonares.

Contudo, o sonar rebocado restringe a manobrabilidade e as operações do submarino, como consumo e profundidade. Sendo então mais viável seu uso em navios para detecção de alvos submarinos, mais precisamente na Guerra Antisubmarina. A seguir na Figura 2.3, um exemplo básico de um TAS rebocado por um navio.

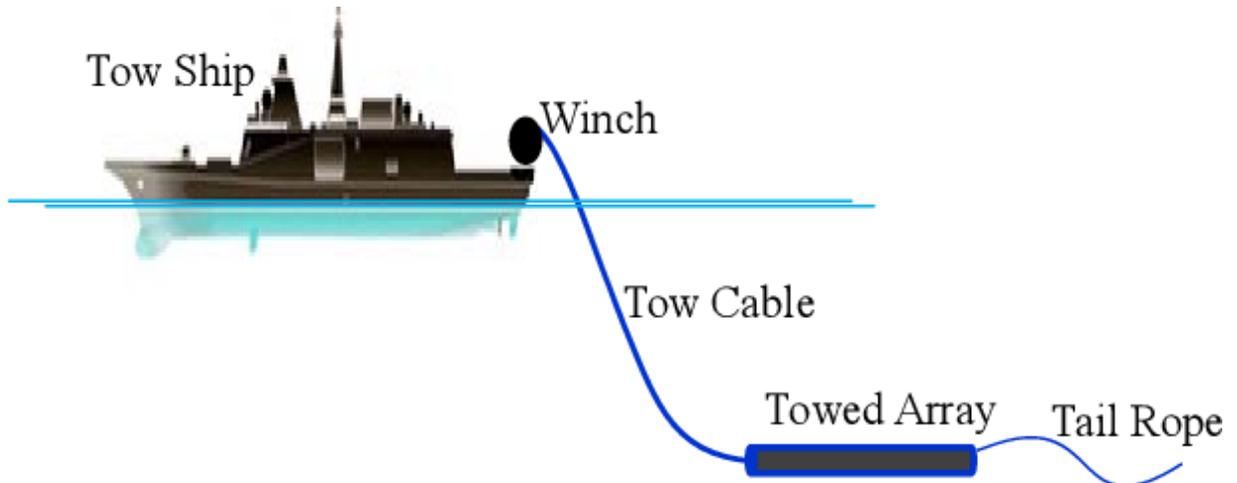


Figura 2.3 – *Towed Array Sonar*. Fonte: J.George, 2020.

## 2.5 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O processamento digital de sinais desempenha um papel crucial no contexto Sonar e passou por várias evoluções ao longo de décadas para melhorar a detecção, rastreamento e classificação de alvos subaquáticos. Inicialmente, o sonar era baseado em sistemas analógicos com enfoque nos sonares ativos, seu processamento era limitado e envolvia a detecção de eco. A principal mudança ocorreu quando o uso de técnicas a partir de Transformadas de Fourier e análise espectral no domínio da frequência, permitiram uma análise mais clara.

Concomitantemente, o uso da estatística na análise de sinais se tornou o estado da arte na tecnologia sonar, pois sinais analógicos reais estão suscetíveis a interferências aleatórias e ruídos e que podem complicar os processos de análise e detecção de eventos de interesse. Com isso, o emprego de redes neurais artificiais e algoritmos de aprendizado de máquina tem se tornado mais comum no processamento de sonar, permitindo uma automação e automatização do sistema respectivamente.

Diante disso, o funcionamento de um sonar de maneira bem simples, após a detecção de um sinal de interesse em uma determinada direção, a Marinha do Brasil utiliza-se de duas técnicas de processamento de sinais que podem ser executadas: análise DEMON (*Detection*

*Modulation on Noise*) e a análise LOFAR (*Low Frequency Analysis and Recording*). Como o ruído de interesse e os sinais provenientes de embarcações são caracterizados por baixas frequências, a análise LOFAR se torna mais apropriada.

### 2.5.1 Análise LOFAR

Por meio da análise LOFAR (*Low Frequency Analysis and Recording*) que consiste em uma análise de banda larga e contempla uma série de passos para processar e visualizar sinais acústicos de baixa frequência provenientes do maquinário do navio. De maneira sucinta, os passos envolvidos na análise LOFAR (Figura 2.4) são os seguintes (DE MOURA JUNIOR, 2018):

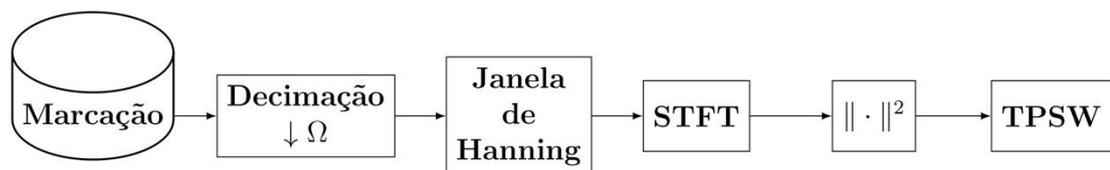


Figura 2.4 – Diagrama de Blocos da Análise LOFAR. Fonte: De Moura Junior, 2018.

1. Decimação do sinal: O sinal acústico é reduzido em taxa de amostragem para diminuir a quantidade de dados a serem processados. Além de adequar a banda passante a banda de interesse, onde se encontra a informação dos navios militares.
2. Aplicação da janela de Hanning: O sinal decimado é multiplicado por uma janela de Hanning. Essa janela enfatiza a faixa de frequência de interesse e reduz os efeitos de vazamento espectral.
3. Cálculo da STFT: A Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT) é aplicada ao sinal. A STFT divide o sinal em janelas de amostras, geralmente sobrepostas, e calcula a representação de frequência dessas janelas. Nesse processo, apenas a magnitude do sinal é considerada, e a informação de fase é descartada.
4. Atenuação de ruído e normalização: O algoritmo TPSW (*Two Pass Split Window*) é utilizado para atenuar o ruído de fundo e normalizar o sinal. Esse algoritmo ajuda a melhorar a qualidade do sinal e destacar as informações de interesse.

5. Visualização no LOFARGRAMA: O resultado da análise é exibido em um LOFARGRAMA, em que a informação de frequência processada para cada janela é mostrada em cada linha do eixo x, enquanto o eixo y representa o tempo. O LOFARGRAMA (Figura 2.5) fornece uma representação visual dos componentes de frequência do sinal ao longo do tempo.

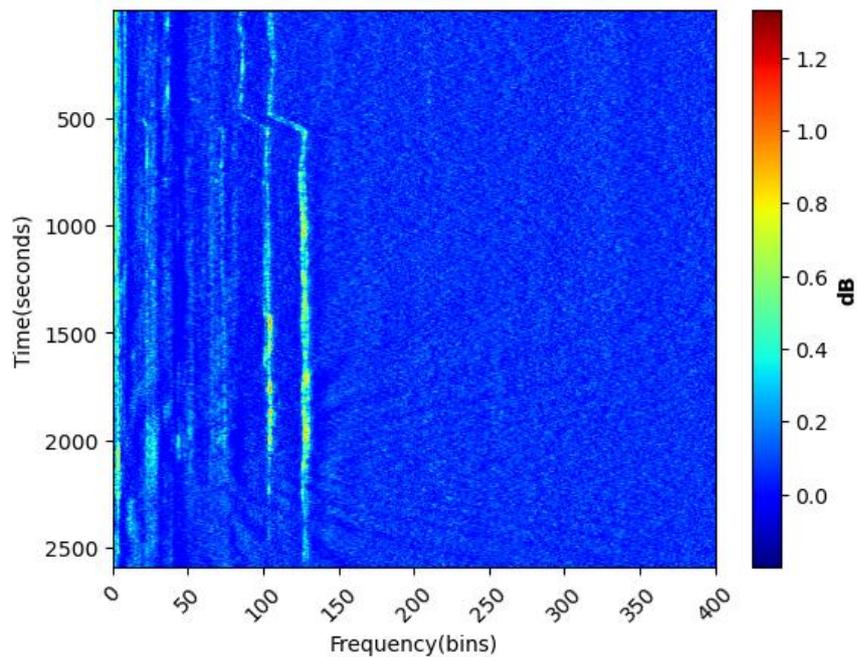


Figura 2.5 – LOFARGRAMA. Fonte: Autor.

O LOFARGRAMA é um recurso importante para visualizar e analisar sinais acústicos de baixa frequência, permitindo identificar padrões, eventos e características de interesse. Logo, a partir desta análise é possível compactar uma grande quantidade de dados de maneira a filtrar as informações mais importantes.

### 2.5.2 Introdução aos Processos Estocásticos

Os processos estocásticos são modelos matemáticos que descrevem a evolução de sistemas ao longo do tempo, nos quais as variáveis envolvidas têm elementos de aleatoriedade, chamadas variáveis aleatórias, que são aquelas cujos valores não podem ser previstos com certeza, mas seguem uma distribuição de probabilidade. Ou seja, estes processos são um meio fundamental para modelar e compreender sistemas que exibem

comportamento aleatório ou incerto ao longo do tempo. Exatamente como se comporta o sonar passivo ao receber inúmeros sinais no fundo do mar.

A grande dificuldade é essa mistura de sinais, pois o objetivo do sonar é encontrar os sinais originais ou de interesse, entretanto sem o conhecimento prévio de suas fontes individuais. A premissa fundamental é que as fontes originais são estatisticamente independentes, ou seja, duas ou mais variáveis aleatórias não tem relação estatística uma com a outra, esta é a definição do Princípio da Independência Estatística (PAPOULIS, 2002) pela Equação 2.4:

$$P(a, b) = p(a)p(b) \quad (2.4)$$

Onde  $P(a, b)$ ,  $p(a)$  e  $p(b)$  são as funções de densidade e probabilidade conjunta e marginais (pdf) das variáveis aleatórias  $a$  e  $b$ . A Função de Densidade de Probabilidade (pdf) descreve a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória assumir um valor em um determinado intervalo. Onde esta função (PAPOULIS, 2002) define como real, mensurável, não negativa e pela Equação 2.5:

$$\int F(x) dx = 1 \quad (2.5)$$

Com isso, pode-se estimar a pdf a partir de um histograma, separando os dados em intervalos discretos chamados “bins”, que resultará em um gráfico de barras que representa a frequência de ocorrência dos valores em cada “bin”.

Como esse somatório de sinais provenientes do mar são não-gaussianos, necessitam de estatística de ordem superior (*HOS – High Order Statistic*) e uma maneira de medir a diferença estatística entre pdf's é a divergência (DE MOURA, 2013). Esta possui um conceito importante na teoria da informação e na estatística, ela é muito utilizada para avaliar o quanto diferentes duas distribuições são em termos de informações contidas nelas. Dentre tantas, a divergência de Kullback-Leibler (KL) é a mais utilizada e é definida por (MACKAY, 2003) pela Equação 2.6:

$$DKL(P||Q) = \sum_x P(x) \log \frac{P(x)}{Q(x)} \quad (2.6)$$

A divergência KL tem a função de medir a similaridade entre duas funções de densidades de probabilidade,  $P(x)$  e  $Q(x)$ . Esta divergência é não simétrica, ou seja,  $DKL(P||Q) \neq DKL(Q||P)$  e sempre não negativa,  $DKL(P||Q) \geq 0$ .

Outra maneira, é utilizar a distância de Wasserstein, uma nova métrica que possui o conceito de trabalho com intuito de medir dissimilaridade entre pdf's. (MESQUITA, 2019) afirma que para duas medidas de probabilidade  $\mu$  e  $\nu$  sobre  $X$ , a distância de Wasserstein de ordem  $p$  é definida pela Equação 2.7:

$$Wp(\mu, \nu) = \left( \inf_{\pi \in \Gamma(\mu, \nu)} \int_{X \times X} d(x, y)^p d\pi(x, y) \right)^{1/p} \quad (2.7)$$

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será descrito a abordagem metodológica adotada para a caracterização do ruído de arrasto. Inicialmente, foi realizada uma análise LOFAR em dois conjuntos de áudios, um contendo registros de arrasto e outro sem essa interferência, ambos capturados por um único hidrofone na região da Baía de Guanabara. Os registros de áudio foram gentilmente cedidos pela Professora Lis Bittencourt, Doutora em Oceanografia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com propósito de extrair informações cruciais.

Através do LOFARGRAMA, foi aplicada a técnica de histogramas para estimar as Funções de Densidade de Probabilidade (pdf's) que estruturam o objeto de análise deste trabalho. Em seguida, foi utilizada a divergência de Kullback-Leibler (KL) para quantificar a diferença entre essas duas distribuições, além do uso da distância de Wasserstein permitindo uma caracterização precisa do objetivo central deste estudo.

#### 3.1 ANÁLISE DO RUÍDO DE ARRASTO

Primeiramente, foi realizada a análise LOFAR em dois cenários diferentes, um com ruído de arrasto presente e outro sem essa perturbação:

- Cenário 1: O sinal de entrada com arrasto, um áudio com duração de 82 segundos, com uma frequência de amostragem de 22.050 Hz, com decimação por 3, com FFT de 1024 pontos em cada janela de processamento (Figura 4.1) e
- Cenário 2: O sinal de entrada sem arrasto, um áudio com duração de 116 segundos, com uma frequência de amostragem de 22.050 Hz, com decimação por 3, com FFT de 1024 pontos em cada janela de processamento (Figura 4.2).

Os parâmetros utilizados na análise LOFAR estão conforme os aplicados em trabalhos anteriores e também pela Marinha do Brasil em seus sistemas atuais (DE MOURA JÚNIOR, 2018).

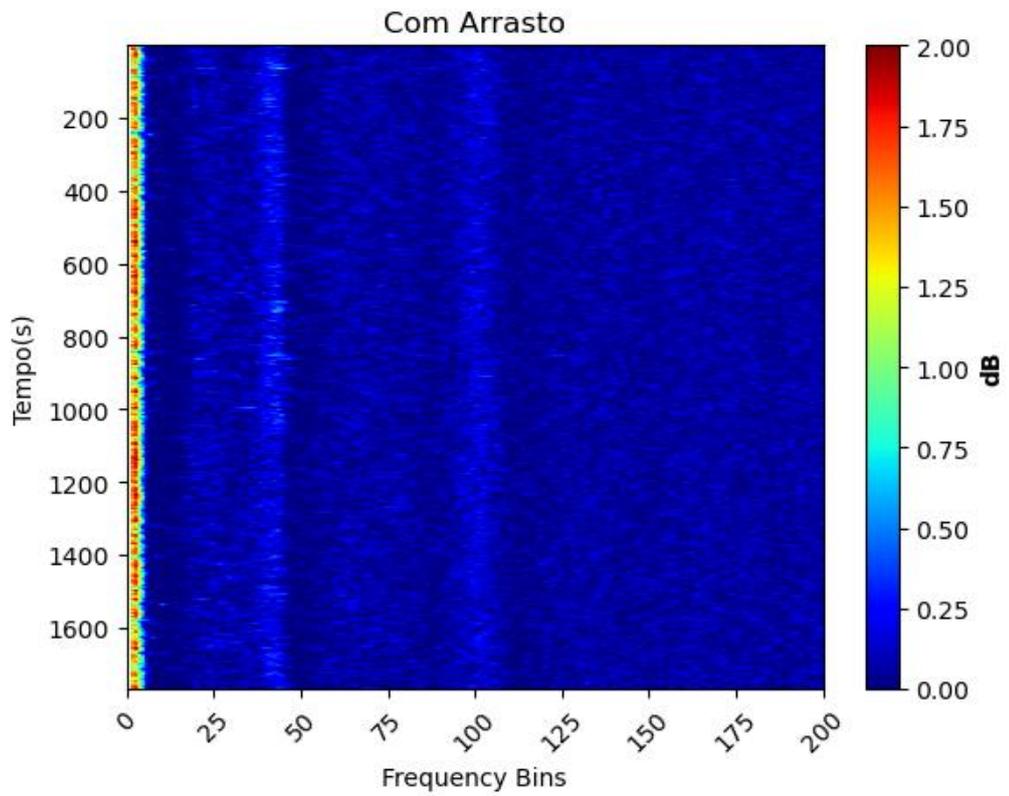


Figura 4.1 – LOFARGRAMA com arrasto.

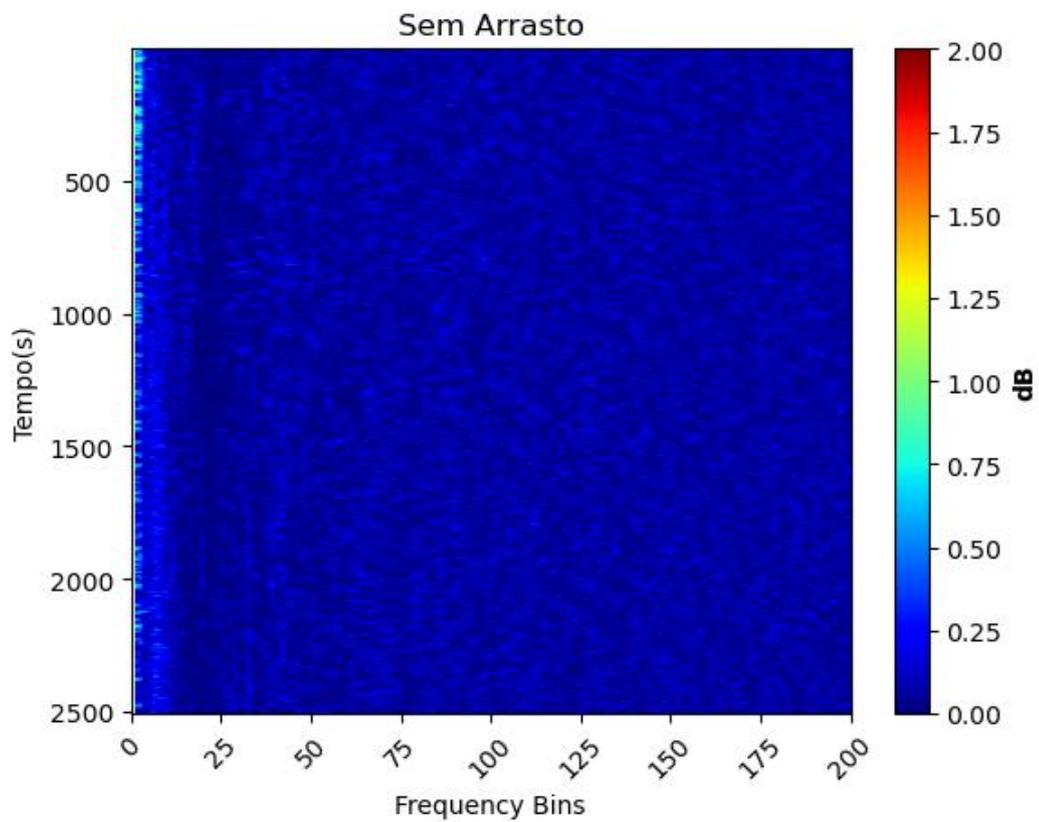


Figura 4.2 – LOFARGRAMA sem arrasto.

Na figura 4.1 é mostrado um LOFARGRAMA como descrito na seção 2.5.1. Como pode ser observado pela grande concentração de cores quentes a esquerda da figura, há presença de sinais de baixas frequências na gravação em questão. Além de dois rastros característicos próximos aos bins 40 e 100. Como a frequência de amostragem é igual a 22.050 Hz com 1024 pontos, cada bin possui uma faixa de aproximadamente 10,7 Hz. Ou seja, o arrasto gerou baixas frequências de até aproximadamente 32,3 Hz nos bins iniciais, uma faixa de 417 – 460 Hz e outra de 1.027 – 1.134 Hz, estas duas faixas referentes aos rastros próximos aos bins 40 e 100.

Diante disso, de maneira a exemplificar tal diferença entre as análises, foi comparado os 3 primeiros bins em histogramas de cada análise (com e sem arrasto) e pode ser observada a diferença de massa estatística a seguir (Figuras 4.3; 4.4 e 4.5):

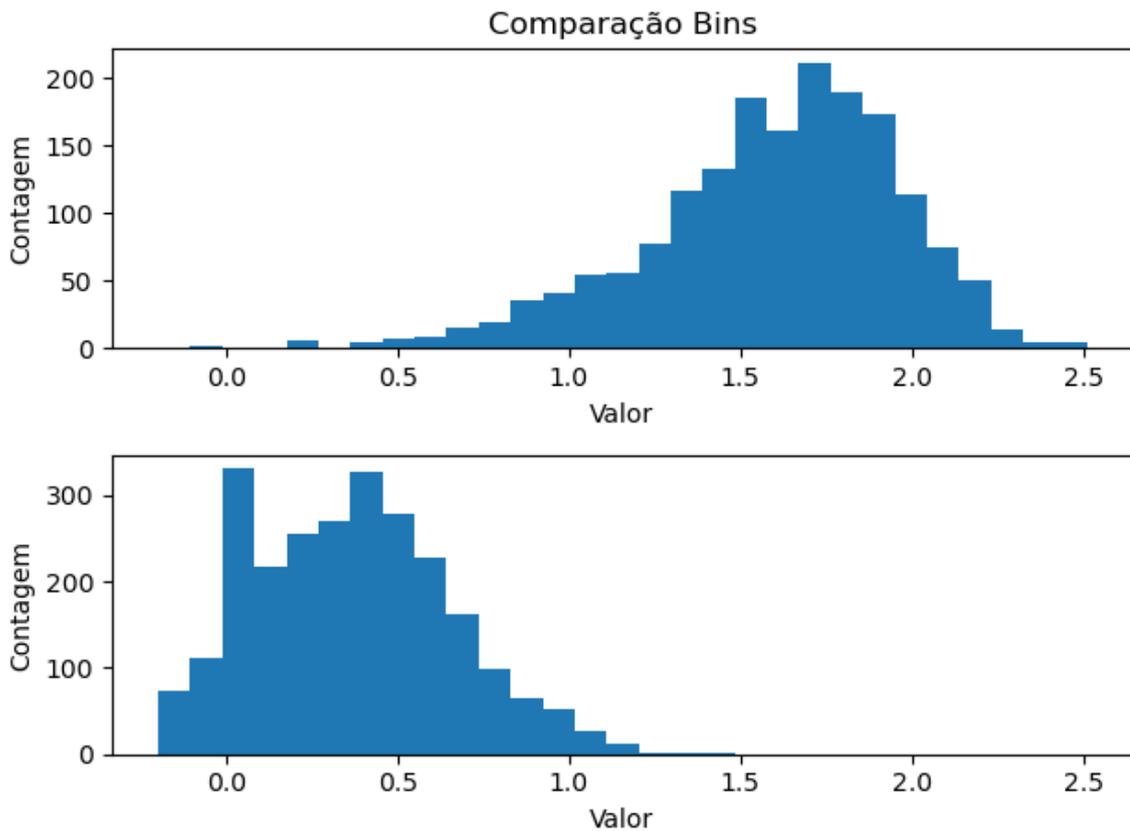


Figura 4.3 - Comparação bin 01 entre as análises LOFAR.

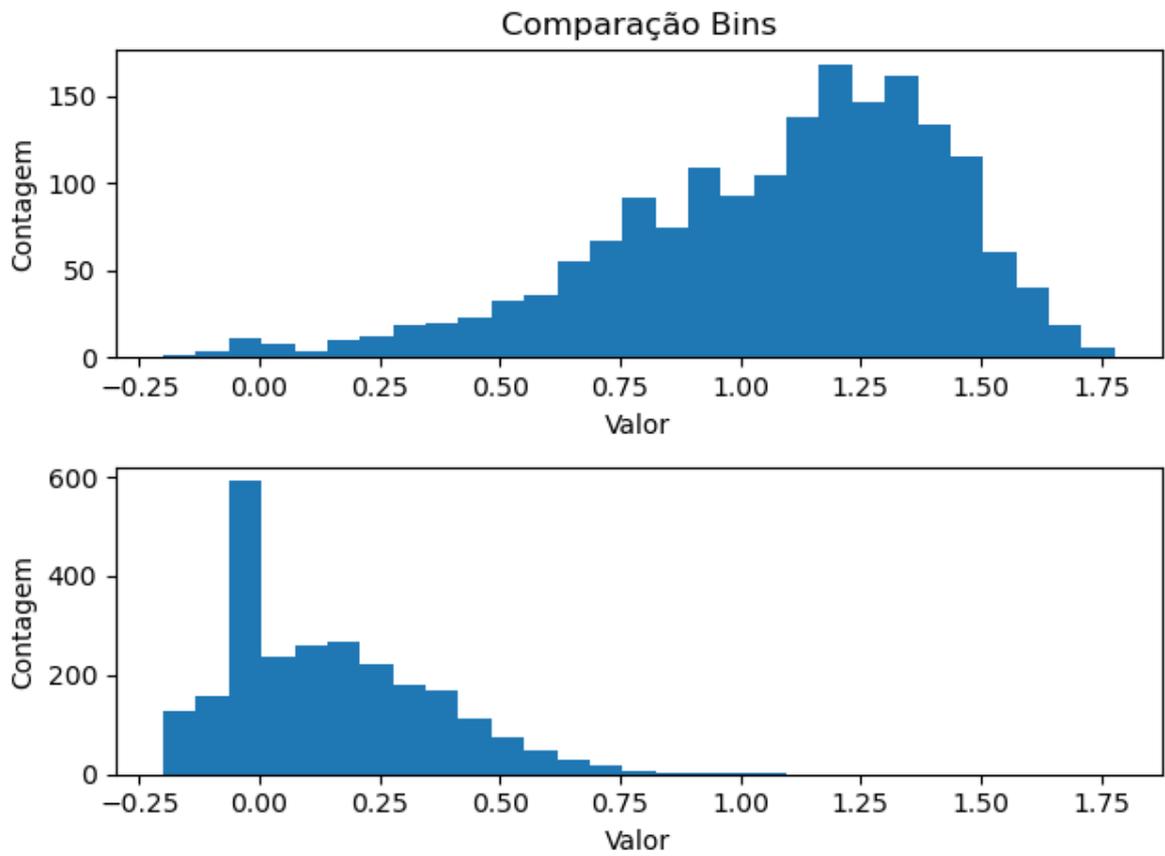


Figura 4.4 - Comparação bin 02 entre as análises LOFAR.

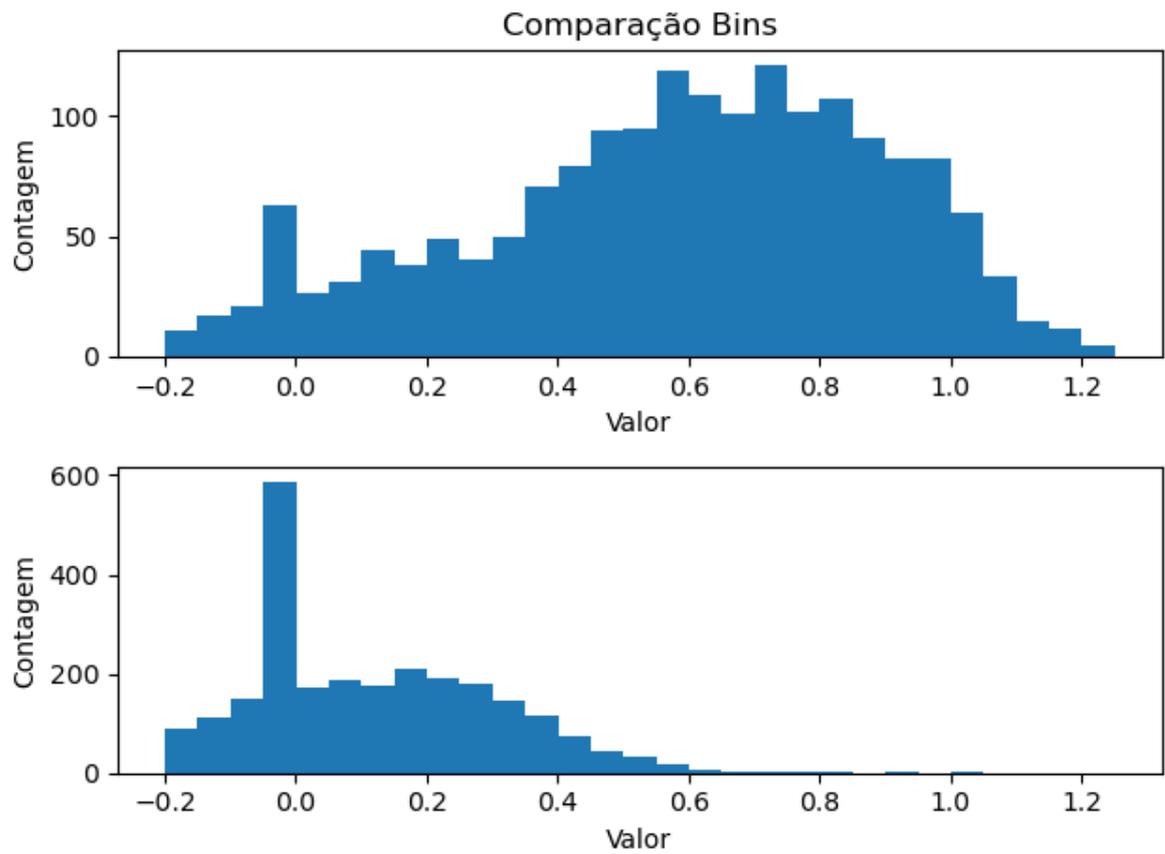


Figura 4.5 - Comparação bin 03 entre as análises LOFAR.

De maneira a quantificar ainda mais essa diferença gerada pelo ruído de arrasto, foi realizada a divergência KL bin a bin e o resultado encontrado consta no gráfico da Figura 4.6:

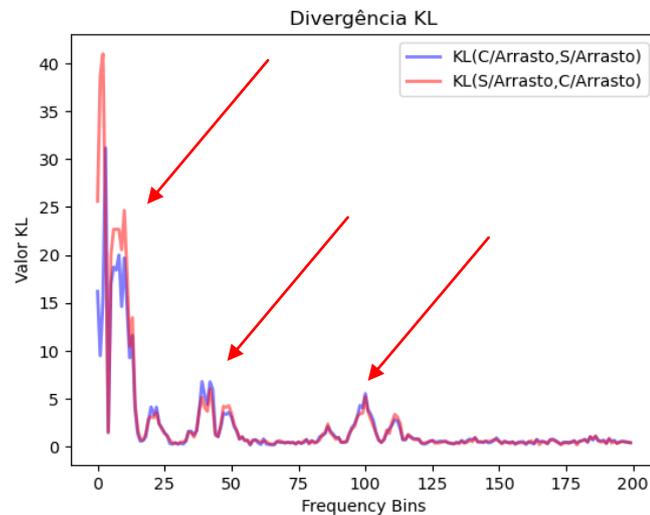


Figura 4.6 – Divergência KL entre as análises LOFAR.

Observa-se que, como na análise anterior, ocorre a diferença entre as distribuições nos bins iniciais e nos intervalos demarcados no gráfico em comparação ao limiar (ruído de fundo), este próximo de 1 na divergência, corroborando para o objetivo do trabalho.

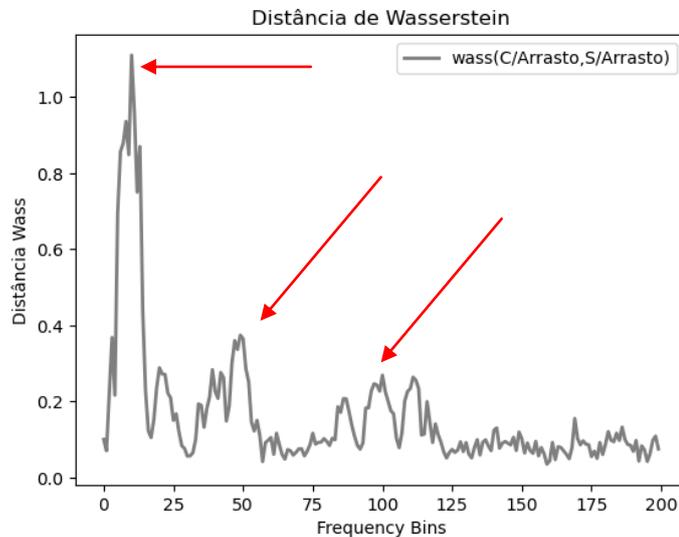


Figura 4.7 – Distância de Wasserstein entre as análises LOFAR.

Agora utilizando a distância de Wasserstein, é observado na Figura 4.7 novamente as alterações bem próximas das análises anteriores, confirmando essa caracterização gerada pelo ruído de arrasto.

## **CAPÍTULO 4**

### **4 CONCLUSÃO**

Este trabalho destacou como o sonar rebocado é fundamental para operações na Guerra Antisubmarina, especialmente em relação à detecção, identificação e classificação de alvos submersos, devido seu maior alcance e baixas frequências. Vale salientar a importância do sonar rebocado como um meio eficaz de monitorar e proteger a vasta extensão da Amazônia Azul, uma região rica em recursos naturais e estrategicamente importante para o Brasil. O sonar rebocado, juntamente com tecnologias de monitoramento por satélite, submarinos e fragatas de última geração, desempenha um papel primordial na manutenção da defesa proativa nas AJB.

Ao longo do trabalho, foi explorada a história e a evolução da acústica submarina, desde os primórdios das ideias de Leonardo da Vinci até os avanços tecnológicos contemporâneos. Entende-se que a compreensão do ambiente subaquático, suas características acústicas e as fontes de ruído são fundamentais para o sucesso das operações submarinas, a exploração científica e a preservação ambiental.

Conforme estabelecido nos objetivos, foi proposto um método para analisar e caracterizar o ruído gerado pelo arrasto do sonar rebocado. Foram realizadas análises a partir de LOFARGRAMAS e utilizadas a divergência KL e a distância de Wasserstein como ferramentas de comparação. O método proposto obteve sucesso, ratificando a interferência causada por esse tipo de ruído nos dados obtidos pelo hidrofone.

Em última análise, este trabalho destaca o papel crítico que o sonar rebocado desempenha na defesa e no desenvolvimento sustentável da Amazônia Azul. À medida que continuamos a avançar na pesquisa e na tecnologia acústica submarina, podemos esperar uma maior clareza, precisão e eficácia nas operações subaquáticas, beneficiando tanto a segurança nacional quanto o conhecimento científico das vastas extensões submersas de nosso planeta.

#### **4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Primeiramente, é notória a importância de usufruir das informações fornecidas por um sonar rebocado pela Marinha do Brasil. Tendo em vista que, cada vez mais, os submarinos se tornam menos ruidosos, dificultando a sua detecção e posterior classificação. Com isso, este

trabalho, além de demonstrar as vantagens do sonar rebocado, evidenciou a importância da análise do ruído de arrasto para verificar a interferência causado por ele.

Entretanto, uma das limitações deste trabalho reside no fato de que se baseia em um único processo de aquisição para conduzir o experimento. Portanto, é importante reconhecer que a utilização de um único dado pode limitar a abrangência das conclusões e a capacidade de extrapolar os resultados para outras situações. A obtenção de mais dados e a realização de experimentos adicionais poderiam enriquecer e fortalecer a análise realizada.

Todavia, considerando que este estudo representa o pioneirismo no Brasil no que diz respeito à análise do ruído de arrasto de um sonar rebocado, incluindo a análise de sinais e experimentos de validação, ele estabeleceu um ponto de partida para pesquisas futuras que poderão expandir e aprofundar o entendimento desse essencial sistema sonar passivo. Isso, por sua vez, contribuirá para o avanço dos estudos relacionados à acústica submarina e consequentemente ao sistema sonar passivo.

## **4.2 TRABALHOS FUTUROS**

Por se tratar de um estudo inicial, como mencionado, apenas um dado experimental foi utilizado. Uma sugestão seria entrar em contato com a Petrobrás previamente e solicitar dados e conhecimento provenientes dos seguintes projetos: Projeto de Monitoramento de Cetáceos na Bacia de Santos (PMC-BS) e do Projeto de Monitoramento Acústico Passivo (PMAP) que ocorre durante a atividade de pesquisa sísmica também na Bacia de Santos, tendo em vista que ambos utilizam um *array* contendo 4 hidrofones.

Outra sugestão seria implementar algoritmos geradores de ruído que simulam as condições de mar e de chuva, resultando uma análise ainda mais rica de informação do ruído ambiente e utilização de algoritmos para separação cega de fontes.

## REFERÊNCIAS

- ANM - Agência Nacional de Mineração. **Plataforma continental**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-sustentabilidade/plataforma-continental-conteudo>. Acesso em: 9 maio 2023.
- A. PAPOULIS, S. U. P., **Probability, Random Variables and Stochastic Process**. McGraw-Hill, 2002.
- CLAY, C.S., MEDWIN H., **Acoustical Oceanography: Principles and Applications**. John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- DE MOURA, N. N. **Deteção e Classificação de Sinais de Sonar Passivo usando Métodos de Separação Cega de Fontes**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2013.
- DE MOURA JUNIOR, N. N. **Deteção de Novidade para Sistemas de Sonar Passivo**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2018.
- GEORGE, J., et al. **Identification and Removal of Non-acoustic Noise in Towed Array Sonar Using F-K Transform for Enhanced Torpedo Detection**. In: International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, 2020.
- GERGES, S. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: UFSC, 1992.
- GOLTZ, Gustavo Augusto Mascarenhas. **Classificação de Navios com uso de Sinais de Sonar Passivo**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2019.
- GUSSEN, Camila Maria Gabriel. **Underwater Acoustic Communication under Doppler Effects**. 2016. 42 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade da Califórnia, San Diego, 2016.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro : Editora Livros Técnicos e Científicos, 2014.
- LEÃO, João Paulo Carvalho Ferreira. **Comunicações Rádio Subaquáticas**. 2015. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- LEO D.J., **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. John Wiley & Sons, 2007.
- MACHADO, Eduardo Manuel da Silva. **Modem Acústico Subaquático a 1 Mbit/s**, 2016.
- MACKAY, David J.C., **Information Theory, Inference, and Learning Algorithms**. First ed. [S.l.]: Cambridge University Press., 2003.

MARINHA DO BRASIL. **Amazônia Azul**. 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spp/amazonia-azul>. Acesso em: 9 maio 2023.

MARINHA DO BRASIL. **Programa Fragatas “Classe Tamandaré”**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/programa-classe-tamandare>. Acesso: 9 maio 2023

MARINHA DO BRASIL. **O que é Amazônia Azul e por que o Brasil quer se tornar potência militar no Atlântico? Economia Azul**. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/economia-azul/noticias/o-que-%C3%A9-amaz%C3%B4nia-azul-e-por-que-o-brasil-quer-se-tornar-pot%C3%Aancia-militar-no-atl%C3%A2ntico#:~:text=Na%20%C3%A1rea%20da%20Amaz%C3%B4nia%20Azul,uma%20rica%20biodiversidade%20ainda%20inexplorados>. Acesso em: 9 maio 2023.

MARINHA DO BRASIL. **SISGAAZ: proteção e monitoramento das águas jurisdicionais brasileiras**. 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sisgaaz-protecao-e-monitoramento-das-aguas-jurisdicionais-brasileiras>. Acesso em: 9 maio 2023.

MATIAS, Nuno Vieira. **A “Clusterização” da Economia Marítima**, 2009.

MESQUITA, Élis Gardel. **Formalismo Termodinâmico em Espaços Não-Compactos via Transporte Ótimo**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Matemática – Universidade de Brasília, 2019.

NASCIMENTO, Cláudia Santos do; GOBARA, Shirley Takeco. **A contextualização do ensino de ondas sonoras por meio do corpo humano**. [s.l.], 2016.

PEREIRA, D. A. L.; CHAVES NETO, A. **Índices de desenvolvimento municipais e royalties do petróleo: uma abordagem multivariada de comparação de perfis entre municípios que recebem ou não royalties pelo petróleo produzido**. Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, v. 11, n. 2, p. 161-176, 2017.

PETROBRAS. **Trinta anos na liderança tecnológica em águas profundas**. Fatos e Dados, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/trinta-anos-na-lideranca-tecnologica-em-aguas-profundas.htm>. Acesso em: 9 maio 2023.

REVISTA MARÍTIMA BRASILEIRA. **Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul – A importância estratégica e o aprimoramento**. 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/rmb/sites/www.marinha.mil.br/rmb/files/RMB%204T-2020%20web.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

RIBEIRO, F. J. L. **Sistema de monitoramento subaquático para exploração de petróleo usando redes de sensores acústicos**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.cos.ufrj.br/uploadfile/1447341224.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

PALMEIRO, A., MARTIN, M., CROWTHER, I., et al. **“Underwater Radio Frequency Communications”**. In: OCEANS, 2011 IEEE - Spain, pp. 1–8, 2011.

ROTTA, L.H.S. et al. **Sensoriamento remoto hidroacústico no mapeamento de macrófitas aquáticas submersas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 5, p.

332-338, 2019. Disponível em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662019000500332&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662019000500332&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 9 maio 2023.

SILVA, J.R.M. **Detecção e localização acústica em águas rasas usando transformada wavelet contínua e outras técnicas espectrais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

URICK, R., **Principles of Underwater Sound for Engineers**. McGraw-Hill, 1983.

WAITE, A. D., **Sonar for Practising Engineers**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.