

**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

**O EMPREGO DA ANÁLISE LOFAR NAS AÇÕES DE GUERRA A/S: Uma Análise Dos
Parâmetros Em Blocos De Processamento.**



1º TEN MATHEUS DE OLIVEIRA GOMES

Rio de Janeiro
2023

1º TEN MATHEUS DE OLIVEIRA GOMES

O EMPREGO DA ANÁLISE LOFAR NAS AÇÕES DE GUERRA A/S: Uma Análise De
Parâmetros Em Blocos De Processamento.

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, D.Sc.

Capitão de Corveta Guilherme Ferreira Murrel Liali, M.Sc

CIAA
Rio de Janeiro
2023

1º TEN MATHEUS DE OLIVEIRA GOMES


O EMPREGO DA ANÁLISE LOFAR NAS AÇÕES DE GUERRA A/S: Uma Análise De
Parâmetros Em Blocos De Processamento.

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


Aprovada em 24 de novembro de 2023

Banca Examinadora:

Prof. José Manoel de Seixas, D.Se. UFRJ



CC Guilherme Ferreira Murrel Liali, M.Se— CGAEM



CC Daniel Gama de Sousa— CIAA



CT Alan da Costa Franqueira - BSIM



Dedico este trabalho à minha avó Antônia e a minha esposa Vanessa Barros, por todos os momentos em que estiveram ao meu lado. Dessa maneira, pude ter a tranquilidade e abnegação necessária para conquistar objetivos e realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho, que representa o culminar de esforço e dedicação ao longo desse ano no Centro de Instrução Almirante Alexandrino.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha amada esposa, Vanessa, pelo seu apoio incansável, paciência e compreensão durante todo esse processo. Sua presença constante e incentivo foram fundamentais para superar os desafios que surgiram ao longo do caminho. À minha querida avó, Antônia, pela inspiração que sempre encontrei em sua sabedoria e amor.

Além disso, expressar minha sincera gratidão aos professores Natanael Moura Junior, José Seixas e Capitão de Corveta Guilherme Ferreira Murrel Liali, cuja orientação e conhecimento desempenharam um papel essencial na qualidade deste trabalho. Suas orientações e críticas enriqueceram minha pesquisa.

Agradeço igualmente aos meus colegas de turma, cuja colaboração e apoio ao longo desse período de aperfeiçoamento avançado fizeram desta jornada uma experiência memorável e enriquecedora.

Por fim, não posso deixar de agradecer ao coordenador do curso de Guerra Acústica, Capitão de Corveta Carlos Martins, por liderar nosso curso e estar sempre pronto para nos orientar da melhor forma possível. A todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso deste trabalho, o meu sincero obrigado.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”

Isaac Newton

O EMPREGO DA ANÁLISE LOFAR NAS AÇÕES DE GUERRA A/S: Uma Análise Dos Parâmetros Em Blocos De Processamento.

Resumo

A utilização da tecnologia de análise LOFAR desempenha um papel fundamental na capacidade de classificar contatos em cenários de Guerra A/S. A análise LOFAR, juntamente com os parâmetros de processamento de sinais, permite identificar padrões e características distintivas nos áudios de navios que são cruciais para a classificação eficaz de contatos

Compreender como os parâmetros de processamento afetam a eficácia da classificação de contatos permite ajustar e otimizar a tecnologia para operar de forma mais eficiente em diferentes condições de águas rasas, contribuindo assim para aprimorar as operações de Guerra A/S e a proteção das águas territoriais.

Este estudo tem como objetivo analisar como cada parâmetro influencia estatisticamente na classificação de contatos em cenários de Guerra A/S. Para atingir esse objetivo, foram considerados os parâmetros dos blocos de processamento na análise LOFAR. Foram analisados 34 áudios de navios, cada um classificado em uma das quatro classes distintas.

A pesquisa envolveu a comparação da análise LOFAR padrão com análises LOFAR distintas, nas quais o bloco de processamento foi modificado. Isso permitiu a avaliação do impacto das modificações nos parâmetros de processamento de sinais na capacidade de classificação de contatos em cenários de Guerra A/S.

Este trabalho contribui para uma compreensão de como a análise LOFAR e os parâmetros dos blocos de processamento afetam a eficácia da classificação de contatos em Guerra A/S. Dessa maneira, contribuindo para escolhas de parâmetros em águas rasas para uma melhor classificação de um contato de interesse.

Palavras- chave: [LOFAR, GUERRA ANTISUBMARINO]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura 1 - Gradiente de Velocidade. [11].....	15
Figura 2 - Lei de Snell-Descartes aplicada à propagação de raios sonoros (ANDERSSON, 2008).	15
Figura 3-Perfil de Velocidade do Som na água. [7].....	16
Figura 4 - Fonte de superfície em um duto de superfície. [7].....	17
Figura 5 - Zona de convergência. Fonte: [7].....	17
Figura 6 - Reflexão no fundo (Bottom Bounce). [7].....	18
Figura 7- Espalhamento esférico. [7].....	19
Figura 10 - Espalhamento cilíndrico. [7].....	20
Figura 11 - Ruídos presentes no ambiente submarino e suas faixas de frequências. [17].....	21
Figura 12 – Principais sonares de um submarino. [17]	22
Figura 13 - Sinal de Áudio [19]	24
Figura 14 – Fenômeno de Cavitação no Hélice, fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas	28
Figura 15 -Diagrama em Blocos da Análise Demom [22].....	28
Figura 16 – Demongrama, fonte: Autor	29
Figura 17 - Diagrama em Blocos Análise LOFAR [22].....	29
Figura 18 – Lofargrama, fonte: Autor.....	30
Figura 19 – Gaussiana, [24].....	31
Figura 20 - Navios e Classes, fonte: Autor.....	33
Figura 21 - Separação de classes, fonte: Autor	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equivalência entre as grandezas eletroacústicas [20]	26
Tabela 2 - Análises LOFAR	34
Tabela 3 - Resultados LOFAR I – HANN.....	35
Tabela 4 - Resultados LOFAR II – BARTLETT	35
Tabela 5 - Resultados LOFAR III – HAMMING.....	36
Tabela 6 - Resultados LOFAR IV - STFT 2048.....	36

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CHA	<i>Cylindrical Huli Array</i>
DEMON	<i>Detection Modulation on Noise</i>
DI	<i>Directivity Index</i>
DT	<i>Detection Threshold</i>
FA	<i>Flank Array</i>
KL	<i>Kullback - Leibler</i>
LOFAR	<i>Low Frequency Analysis and Recording</i>
MB	Marinha do Brasil
NL	<i>Noise Level</i>
PL	<i>Propagation Losses</i>
PROSUB	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
PRS	<i>Passive Ranging Sonar</i>
PVS	Perfil de Velocidade do Som
SisGAAz	Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
SL	<i>Source Level</i>
TL	<i>Transmission Loss</i>
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação	12
1.2 Objetivo do Trabalho	12
1.3 Organização do Texto	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Transmissão do Som no Mar.....	13
2.2 Perdas.....	18
2.2.1 Perdas por espalhamento.....	18
2.2.2 Atenuação.....	19
2.3 Ruído	21
2.4 Sonar	22
2.5 Sinais	24
2.6 Análise DEMON	27
2.7 Análise LOFAR	29
2.8 Processos Estocásticos	30
3 MATERIAIS E METÓDOS.....	33
4 RESULTADOS.....	35
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38
ANEXO	40

1 INTRODUÇÃO

A importância do submarino em conflitos bélicos deve a sua capacidade de realizar diversos tipos de missões, dentre elas: [1] vigilância, monitoramento de outros navios e submarinos, a realização de operações de combate naval, a coleta de informações e a realização de operações de guerra eletrônica.

Além disso, possui uma característica que é bem superior aos outros meios envolvidos em conflito naval, seu poder de ocultação e elemento surpresa. [2] Sob outro enfoque, no cenário estratégico e de soberania, ele possui o atributo de negar o uso do mar pelo inimigo o que contribui para dissuasão da soberania nacional.

Dessa maneira, ressalta-se a importância desse meio nos principais conflitos do século XX e XXI, destacando seu papel na Guerra Antissubmarino, com sua facilidade de ocultação e capacidade de detecção e classificação de alvos.

[3] Os primeiros relatos de esboço de um submarino apareceram em 1578, pelo inglês William Bourne, o qual em seu desenho apresenta um barco que submerge. É fato que, esta tecnologia seria de suma importância no cenário estratégico internacional e passou por diversas adaptações no decorrer da história.

[4] A Marinha do Brasil, iniciou a mentalidade para obter um meio submersível em 1891. A partir de 1911, o então Capitão de Corveta Felinto Perry foi designado como Chefe de uma Subcomissão para aquisição de três submersíveis encomendados ao Governo Italiano.

Na atualidade, a Marinha do Brasil conta com os seguintes submarinos: S30 - "Tupi", S31 - "Tamoio", S33 - "Tapajó", S34 - "Tikuna" e S40 - "Riachuelo". Além disso, a Marinha do Brasil investe no Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB), com intuito de reiterar o que foi lançado na Estratégia Nacional de Defesa em 2008, a necessidade de um submarino com propulsão nuclear. Este programa, tem como propósito a construção de quatro submarinos convencionais e o primeiro submarino nuclear da força. Ademais, será realizada uma transferência de conhecimento entre Brasil e França.

A necessidade de ter uma Marinha enfatizando a renovação de seus meios deve-se a extensão continental do Brasil e sua importância no Atlântico Sul. [5] A Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira conta com uma área 3,6 milhões de metros quadrados, o que equivale ao território da floresta amazônica brasileira. Esta região, possui uma importância econômica para o Brasil em diversos aspectos, como: pesca, recursos minerais, biodiversidade marítima, extração de petróleo e aproveitamento de energia maremotriz.

Por consequência, para manter o domínio neste território, é necessária uma MB com tecnologia para gerenciar e garantir a segurança territorial. Com isso, [6] a MB contará com o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz). O mesmo, terá como função principal monitorar de forma contínua e integrada as águas jurisdicionais brasileiras.

1.1 Motivação

Com a relevância do Brasil no cenário político e internacional e o papel da MB no Atlântico Sul, é necessária uma preocupação com os principais meios em uma guerra naval, dentre eles, o submarino tem um grande destaque. Com isso, um sistema moderno de classificação de contatos de um submarino possui uma importância no panorama mundial.

A maior ferramenta para detecção e classificação de contatos de um submarino é o SONAR (Sound Navigation and Ranging), [7] que é composto por um array de hidrofones que podem ser configurados de maneiras distintas. Dessa maneira, é preciso aprimorar técnicas para uma melhor certeza de suas análises, com isso, uma melhor probabilidade de classificação.

Ao desenvolver e aperfeiçoar técnicas de classificação de contatos de submarinos, há contribuição para aumentar a segurança e a eficácia da MB, garantindo que é possível identificar ameaças e potenciais intrusos de maneira precisa.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho, terá enfoque de como é realizada a detecção de um contato de interesse por um submarino através da análise LOFAR (Low Frequency Analysis and Recording). A partir disso, será realizado um estudo de seus principais parâmetros nos blocos de processamento de cada análise.

Dessa maneira, este estudo será feito através de áudios de Navios que foram coletados na raia acústica de Arraial do Cabo cedidos pela Marinha Do Brasil à Universidade Federal do Rio de Janeiro, e com isso, a partir de uma análise estatística, verificar como cada parâmetro no bloco de processamento influência na separação de classes distintas de navios.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho será organizado em 5 capítulos. O capítulo 1, consta a introdução do trabalho, onde aborda as ideias iniciais. O capítulo 2, trata da fundamentação teórica para

esclarecer melhor os conceitos que constam na análise LOFAR, com isso, compreender as análises dos parâmetros em blocos de processamento.

Além disso, o capítulo 3, trata sobre materiais e métodos que serão utilizados na análise deste projeto. No capítulo 4, analisaremos os resultados de como cada parâmetro influencia no processamento do sinal e o que pode ser alterado nos indicadores para uma melhor classificação do contato de interesse. No capítulo 5, consta as considerações finais relativas à análise supracitada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transmissão do Som no Mar

Como todo nosso estudo é feito no ambiente marítimo,[8] usamos ondas sonoras ao invés de ondas eletromagnéticas, pois um sistema ideal para detecção de alvos submersos deve possuir três propriedades básicas:

- Alta Velocidade de Transmissão
- Alta Resolução
- Adequada Distância de Penetração

Entretanto, nenhuma das ondas é capaz de preencher todas as três propriedades, todavia, mesmo que a onda sonora tenha uma velocidade menor do que a onda eletromagnética no meio aquático, ela possui a característica de viajar por milhares de milhas no mar, que seria a propriedade básica de Adequada Distância de Penetração. Portanto, a onda acústica é usada em aplicações subaquáticas.

Neste parágrafo analisaremos as principais características do som no mar, [9] o som é uma onda longitudinal, pois sua propagação é paralela a sua trajetória e sua transmissão ocorre através de compressões e rarefações, esta propagação do som ocorre quando um objeto vibra.

Sua propagação no meio elástico é descrita pela seguinte equação:

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial u^2}$$

Eq. (1)

- C = a velocidade do som no meio elástico;
- $\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$ representa a segunda derivada da pressão sonora (p) em relação à posição (x);

Entretanto, de acordo com [10] e dados empíricos, a equação mais utilizada para representar a velocidade do som no mar é dada pela seguinte expressão:

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

Eq. (2)

A partir da análise dessa equação, declaramos as seguintes variáveis:

- T = Temperatura (°C)
- S = Salinidade (Partes/mil)
- Z = Profundidade (metros)
- C = velocidade do som (m/s)

Com auxílio dessa equação, conseguimos analisar matematicamente que o fator preponderante e que exerce maior influência para velocidade do som na água é a temperatura. Entretanto, abaixo de 1000 metros a pressão passa a ter mais efeitos sobre a velocidade do som, pois a partir dessa profundidade, o oceano já está com uma temperatura constante.

Para analisarmos os raios sonoros, [10] deve-se observar que eles percorrem caminhos retilíneos e quando há uma alteração na velocidade, refratam e curvam-se para a velocidade mais lenta. [9] A refração é um fenômeno óptico que ocorre quando a luz passa de um meio para outro com uma densidade óptica diferente e analogamente para ondas mecânicas. Isso resulta em uma mudança na velocidade de propagação da luz e, conseqüentemente, uma mudança na direção em que a luz se move. Uma equação que exemplifica este fenômeno, é a lei de Snell:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_2) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_1)$$

Eq. (3)

- n_1 e n_2 índice de refração do meio.
- θ_1 e θ_2 ângulo de incidência e refração.

Dessa maneira, ocorre a variação da velocidade do som com a profundidade do local que é denominado gradiente de velocidade, este pode ser dividido em três situações:

- Gradiente positivo: Velocidade aumenta com a profundidade;
- Gradiente negativo: Velocidade diminui com a profundidade;
- Gradiente neutro ou isovelocidade: velocidade do som constante com a profundidade.

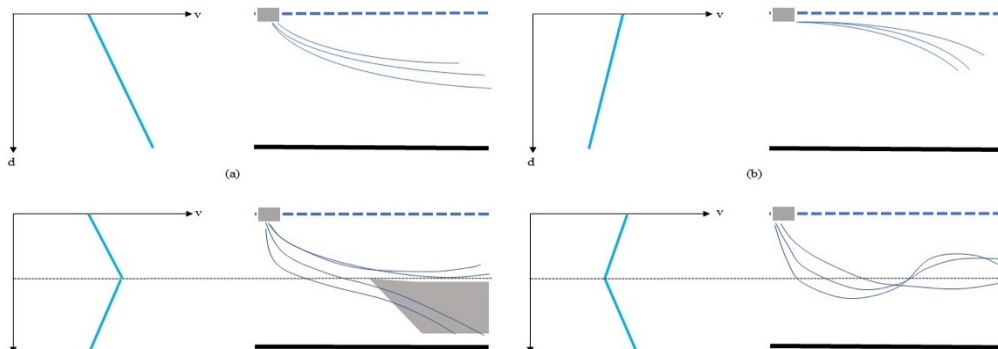


Figura 1 - Figura 1 - Gradiente de Velocidade. [11]

Com intuito de previsões acústicas em determinado local, deve ser traçado o Perfil de Velocidade do Som (PVS), este perfil é determinado pela função $c(z)$ que estão inclusos os efeitos da salinidade e pressão. Além disso, [10] há a estratificação do mar, que separa o mar em camadas horizontais, com base na sua densidade. Este, é o mais importante para propagação do som no oceano.

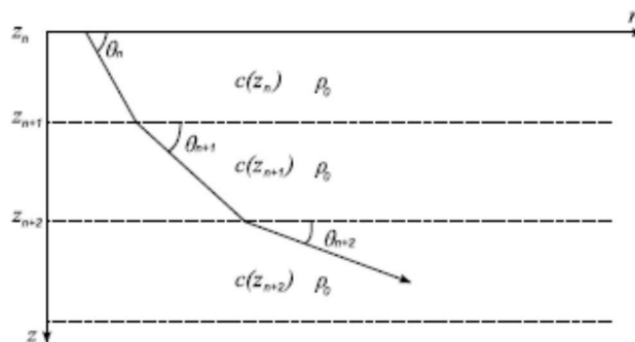


Figura 2 - Lei de Snell-Descartes aplicada à propagação de raios sonoros (ANDERSSON, 2008).

Existem instrumentos como o batitermógrafo que podem ser colocados em aeronaves e navios, e a partir disso, medir a temperatura por profundidade para ter uma maior probabilidade

de identificar a velocidade do som em cada camada. Existem diversos padrões de propagação e cada um pode produzir um PVS diferente. Com isso, [10] verificaram que o mar poderia ser dividido em quatro principais camadas, que são:

- Camada de superfície:

Sua principal característica é que sofre uma grande influência de ações do vento sobre a superfície do mar, causando uma água de camada isoterma.

- Termoclina sazonal:

Nesta camada, a temperatura começa a diminuir com a profundidade e está camada sofre uma grande influência da estação do ano.

- Termoclina principal:

Esta camada, não é afetada pela estação do ano, a temperatura diminui com a profundidade, ocorrendo apenas um aumento da pressão.

- Camada isotérmica profunda:

Nesta camada, temos uma temperatura constante em aproximadamente 4°C, o fator que maior influência na velocidade do som a partir dessa profundidade é a pressão. A imagem a seguir exemplifica as camadas e o perfil de velocidade do som em cada profundidade.

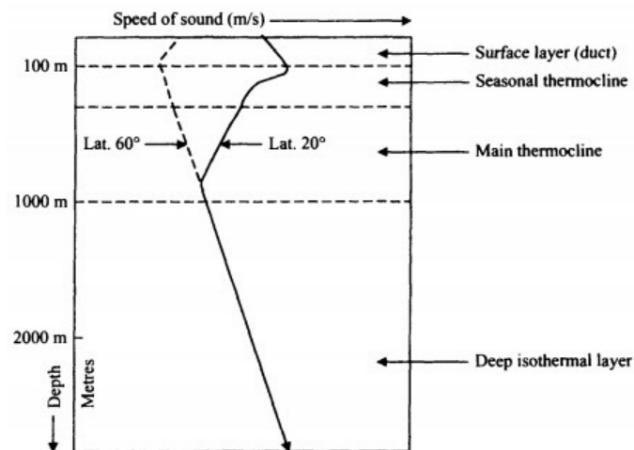


Figura 3-Perfil de Velocidade do Som na água. [7]

Como o som depende de três principais fatores, verifica-se que em virtude desses parâmetros são gerados fenômenos de propagação recorrentes no oceano e os principais são:

Dutos de superfície: Ocorre quando o som viaja através da camada isotérmica de superfície por grandes distâncias. Nesta camada, é criada um tipo de estrutura que o som se reflete, aumentando a distância de propagação. Ademais, este fenômeno tem importância para animais, pois se comunicam a ou localizam suas presas.

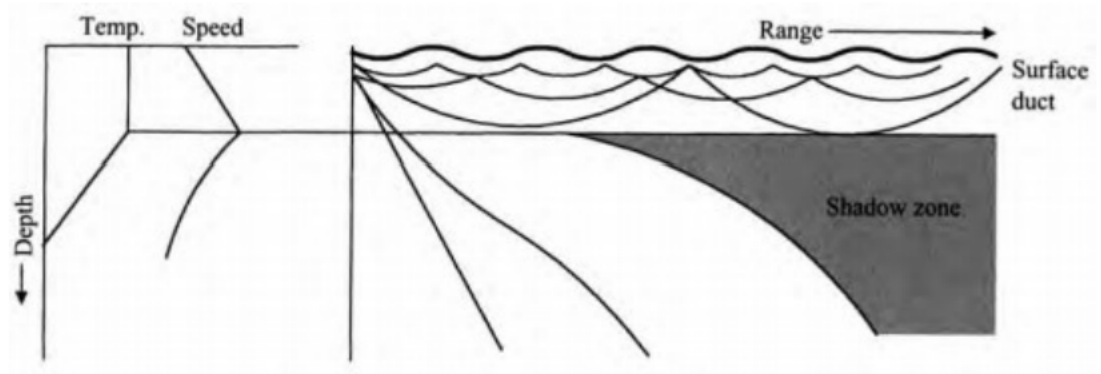


Figura 4 - Fonte de superfície em um duto de superfície. [7].

Zonas de Convergência: Este fenômeno ocorre embaixo da superfície da água e em determinadas condições de temperatura, salinidade e pressão criam gradientes de velocidade do som. Estas, atuam desviando a onda sonora para um ponto onde elas se convergem e se encontram, ademais, tem relevância para comunicação submarina, pois pode aumentar a eficiência de equipamentos.

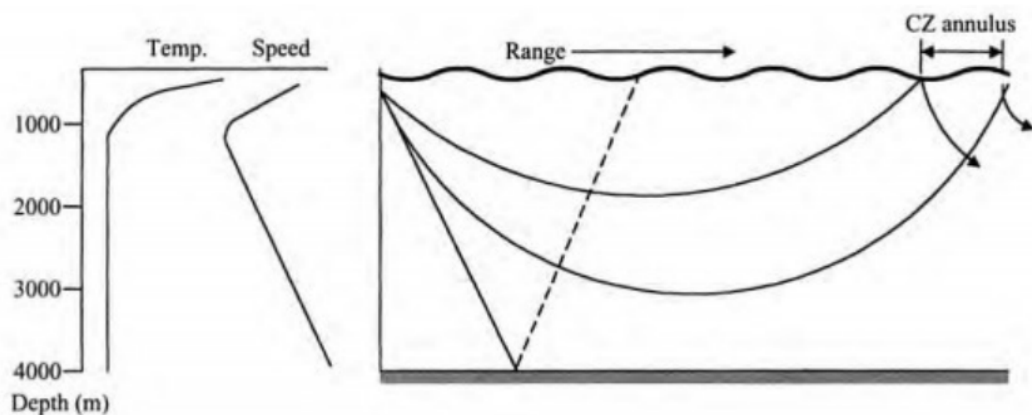


Figura 5 - Zona de convergência. Fonte: [7]

Reflexões de Fundo: Este evento pode ocorrer quando ondas são refletidas no fundo do mar. Ele depende da frequência da onda, ângulo de incidência e tipo de fundo. Fundos irregulares tendem a refletir mais ondas sonoras do que fundos homogêneos. Com este fenômeno, é possível a detecção de submarinos no oceano.

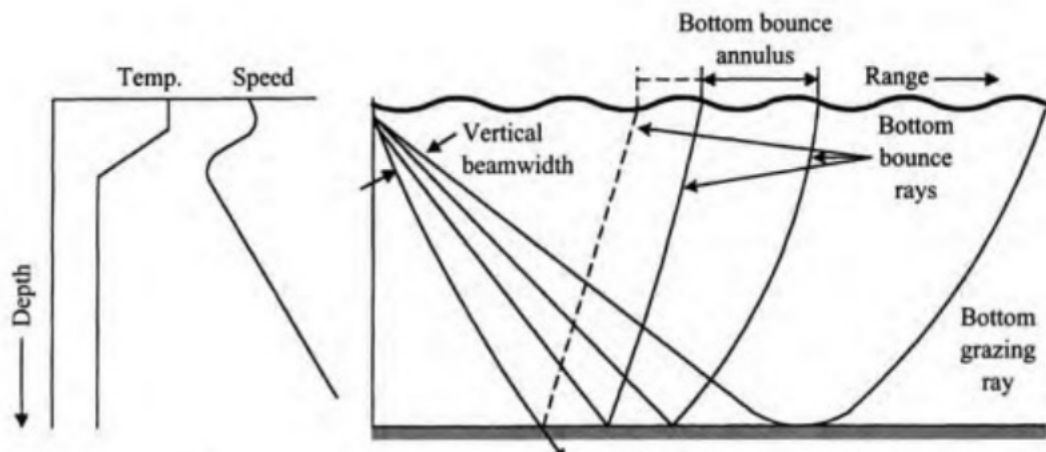


Figura 6 - Reflexão no fundo (Bottom Bounce). [7]

2.2 Perdas

Foi descrito no capítulo 2.1, as principais propriedades de onda sonora e como é sua propagação no oceano, com seus perfis de velocidade do som. Na sessão 2.2, veremos que há perda de energia em sua propagação devido a diversos fatores físicos que ocorrem no meio. [7] A perda por propagação (PL, Propagation Losses) é uma medida que quantifica o quanto a intensidade reduziu entre o receptor do som e a fonte. Dada pela seguinte equação:

$$PL = 10 \log \frac{I_0}{I_r}$$

Eq. (4)

2.2.1 - Perdas por espalhamento

No espalhamento esférico, o som é irradiado como ondas em formas de esfera concêntricas a partir de uma fonte sonora e podem ser representados como um número infinito de linhas retas que se originam dessa fonte puntiforme. A perda por espalhamento ocorre da redução da intensidade acústica, pois há um aumento da área a qual a energia acústica se distribui, esse fenômeno é chamado dispersão. Podemos analisar de acordo com a Figura 7, que o som decresce com o inverso do quadrado da distância. A equação da dispersão esférica é dada por $20\log(R)$.

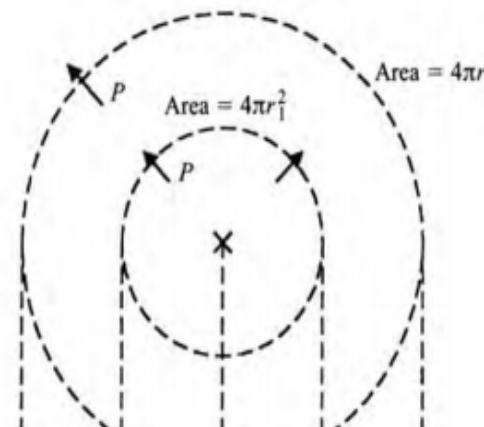


Figura 7- Espalhamento esférico. [7]

[7] Entretanto, no espalhamento cilíndrico o som se propaga em forma de curvas de um cilindro que está em expansão, mantendo o parâmetro como altura constante. A fórmula que descreve o fenômeno para dispersão cilíndrica é a metade da dispersão esférica, representada por $10\log(R)$.

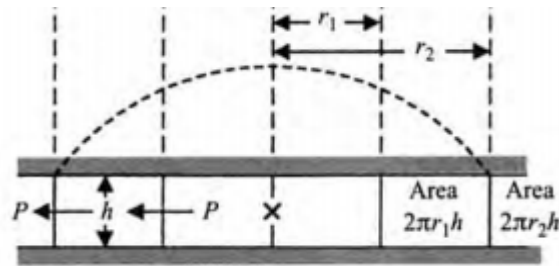


Figura 8 - Espalhamento cilíndrico. [7]

2.2.2 – Atenuação

A atenuação ocorre quando a onda sonora se propaga através de um volume de água e sofre uma perda de energia. [12] Este fenômeno ocorre em virtude de dois fatores que são absorção e reverberação. Além disso, toda essa perda de energia ocorre durante a compressão e rarefação da onda acústica quando se propaga através do meio, portanto esta energia é transformada em calor e este processo é a absorção. Outro fator citado, foi a reverberação que é causada por refletores na água que será abordado posteriormente.

As perdas por absorção ocorrem por dois principais fatores: Viscosidade e Relaxamento Molecular. A viscosidade ocorre tanto em água salgada quanto em água doce e é proporcional ao quadrado da frequência. O Relaxamento Molecular, esta presente somente em água salgada por dissociação em íons em molécula de soluto. Com essas perdas, é gerado um coeficiente de atenuação α , em dB/km. Tal coeficiente é proporcional a temperatura e frequência.

A reverberação ocorre quando ocorre emissão de um impulso sonoro e neste som há uma interferência causada por fontes externas. Este fenômeno pode ser dividido em três tipos:

- Reverberação de Superfície: É causada por agitação na superfície do mar, o principal fator ambiental que influencia é a velocidade do vento.
- Reverberação de Fundo: Ocorre em função do ângulo de incidência do raio sonoro com o fundo, o tipo de fundo é proporcional a reverberação, o fenômeno é mais intenso em fundo de pedra, concha e cascalho. Além disso, vale ressaltar que há aumento da reverberação com o aumento da frequência e uma parte da energia sonora é absorvida pelo fundo.
- Reverberação de Volume: Esta é causada por reverberadores ou refletores, podem ser animais como peixes, organismos marinhos e partículas em suspensão. Nos peixes, ocorre devido a sua bexiga natatória, que tem a capacidade de amplificar ou atenuar certas frequências de som, contribuindo para reverberação de volume.

2.3 Ruído

O oceano possui uma característica acústica significativa que é [13] o seu ruído ambiente, o qual carrega grande quantidade de informações sobre o estado do mar, os processos tectônicos que ocorrem na crosta terrestre abaixo da superfície marinha e o comportamento dos animais marinhos. Esse ruído é composto por diversos sons presentes no oceano, que [14] incluem desde ruídos gerados por terremotos e erupções vulcânicas submarinas até o som da chuva, tráfego de navios, ruídos biológicos, ventos e ondas de superfície, entre outros podemos citar os principais como: [15]

- Ruído próprio: Ruído derivado do navio ou submarino e equipamentos, exemplo: O ruído do eixo.
- Ruído de fundo do sonar: Ruído que pode ser interpretado com o da saída do transdutor, que pode limitar a detecção de sinais.
- Ruído Irradiado: O ruído irradiado no ambiente submarino refere-se ao som produzido por fontes subaquáticas, como navios, plataformas de petróleo, equipamentos de perfuração e outros dispositivos mecânicos em operação no oceano. Na figura a seguir, é possível analisar ruídos presentes em um ambiente submarino e as principais frequências.

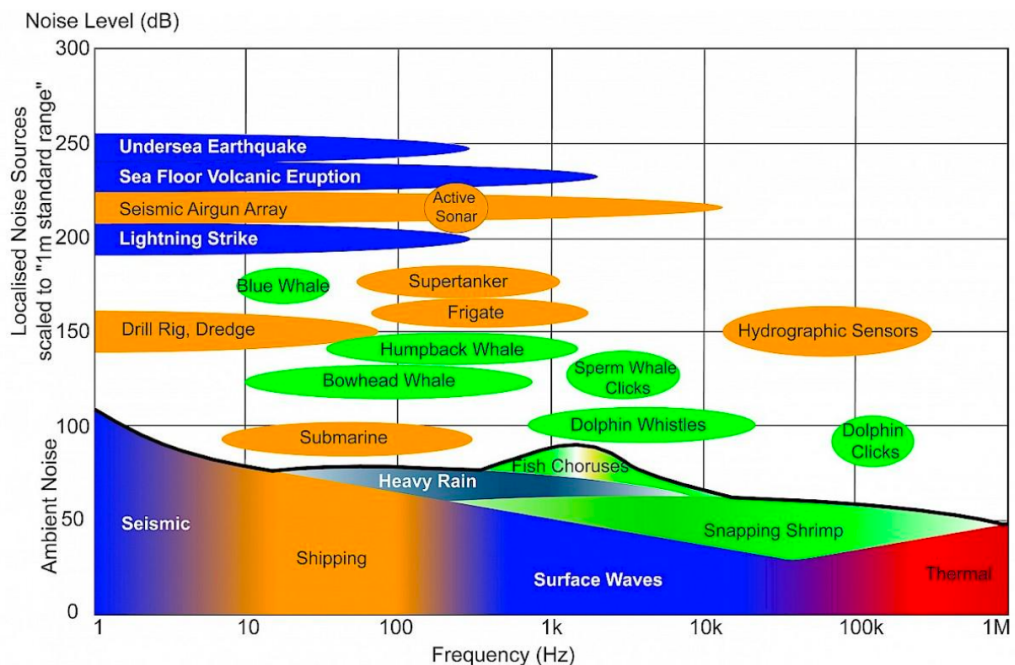


Figura 9 - Ruídos presentes no ambiente submarino e suas faixas de frequências. [17]

2.4 Sonar

[16] Sound Navigation and Ranging (SONAR), o primeiro registro de estudo do som surgiu com Leonardo da Vinci em 1490, quando inseriu um tubo na água e verificou que era possível escutar embarcações que navegam próximo da sua localidade. Entretanto, só houve maior relevância como objeto de estudo a partir de 1912, com o naufrágio do Titanic. Com a Primeira Guerra Mundial, a necessidade acarretou um aumento de pesquisas sobre o uso do som.

A partir da Segunda Guerra Mundial, novos tipos de detecção foram desenvolvidos como sonobóias, sonda de detecção de minas, sonar dipping/dunking. Atualmente, com o desenvolvimento científico, sonares possuem diversas aplicações diferentes em âmbitos militares e civis. No âmbito civil, destaca-se o uso em sonares de varredura lateral, sonares de pescas e sonares rebocados.

Sonares podem ser ativos e passivos, um sonar passivo “escuta” sons naturais ou emissões, dessa maneira, possui a capacidade de identificar e rastrear objetos subaquáticos. Um sonar ativo, emite um pulso sonoro e com o eco do sinal refletido por objetos ou meios é capaz de localizar distância, tamanho ou forma dos objetos submersos. Em contrapartida, analisaremos os tipos de sonares em submarino da MB, pois este é o principal sensor utilizado, visto que, [17] os demais como ópticos e eletromagnéticos não são eficazes no ambiente aquático. A Figura 10, ilustra os principais sonares de um submarino da MB:

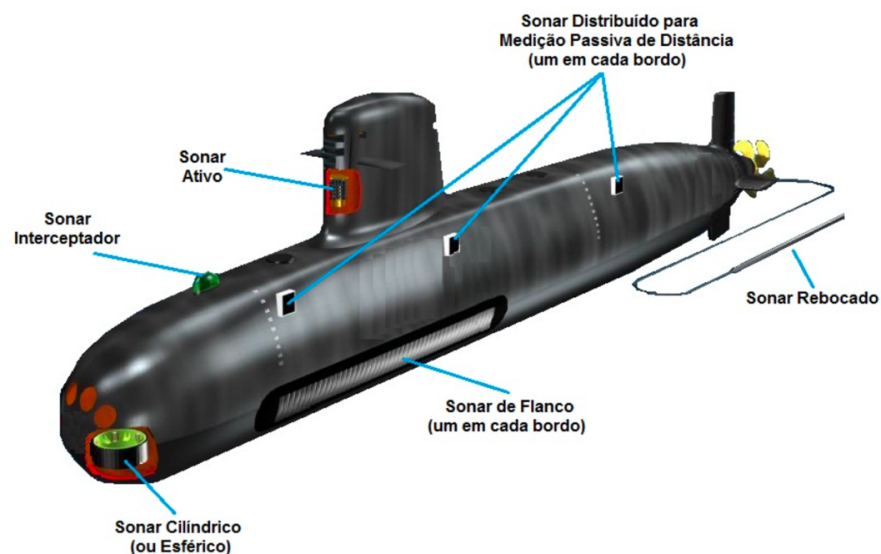


Figura 10 – Principais sonares de um submarino. [17]

- Sonar Cilíndrico (CHA – Cylindrical Huli Array): Arranjo de sensores na forma cilíndrica que é utilizado na forma passiva para acompanhamento e detecção de alvos.
- Sonares de Flanco (FA – Flank Array): Sonares que trabalham em modo passivo para detecção de contatos diferem do sonar cilíndrico, haja vista que possuem uma maior distância de detecção, entretanto, possuem menor ângulo de cobertura, pois são planos.
- Sonar de Medição Passiva de Distancias (PRS – Passive Ranging Sonar): São sonares passivos e seus sensores estão distanciados, com isso, possui grande capacidade de estimar distâncias de contatos por algoritmos de triangulação.
- Sonar Rebocado (Towed Array): Um sonar é montado em um dispositivo e passa a ser rebocado pelo submarino. Por ser rebocado seus hidrofones estão a uma distância do hélice do submarino o que acarreta da diminuição do ruído próprio. Além disso, em virtude do seu tamanho, possui uma maior diretividade, com isso, consegue detecção de alvos a distancias superiores aos outros sonares.
- Sonar Interceptador (Interceptor Sonar): Sonar que detecta sinais acústicos provenientes de sonares ativos de outros submarinos. Além disso, pode extrair dados como duração do pulso e intensidade do sinal.
- Sonar Ativo (Active Sonar): Este sonar é utilizado na fase final do lançamento do torpedo, para ter uma melhor precisão de onde está localizado o alvo pelo sistema de combate.

Quando falamos em análise LOFAR e DEMON, enfatizamos o uso do sonar passivo, [18] que tem como propósito detectar sinais que são contaminados por ruídos. Matematicamente, conseguimos verificar o desempenho a partir da equação do sonar passivo:

$$SL - TL = NL - DI + DT$$

Eq. (5)

- SL (Source Level) – Nível da fonte projetor;
- NL (Noise Level) – Ruído eletrônico e ruído ambiente;
- TL (Transmission Loss) – Perda por transmissão;

- DT (Detection Threshold) – Limiar de detecção, valor o qual o sinal deve exceder o ruído para haver detecção; e
- DI (Directivity Index) – Índice de diretividade.

2.5 Sinais

Nesta seção, vamos relacionar as ondas sonoras geradas por qualquer meio no oceano com um sinal, [19] um sinal contém algum tipo de informação de algum fenômeno ou acontecimento. Um exemplo, seria o sinal de áudio de acordo com a figura 11:

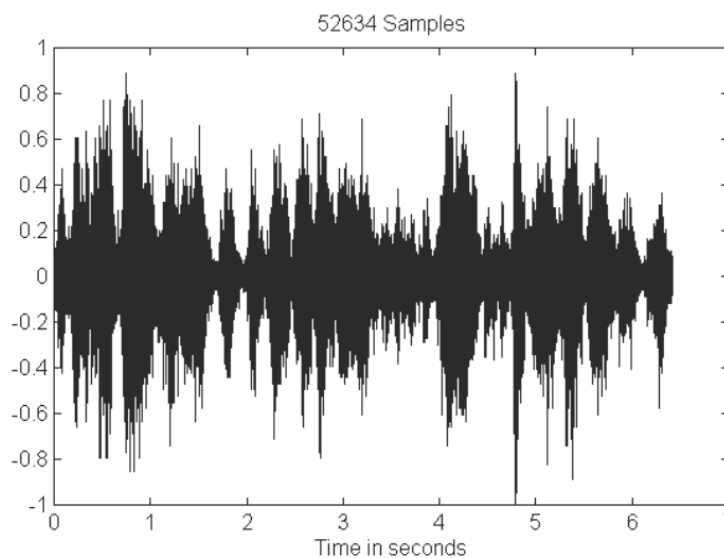


Figura 11 - Sinal de Áudio [19]

Os sinais podem ser classificados de acordo com os seguintes parâmetros:

- Sinais Unidimensionais: São sinais que possuem apenas uma variável independente.
- Sinais Multidimensionais: São sinais que possuem mais de uma variável, exemplo: Imagem de vídeo, possui duas variáveis independentes da posição.
- Sinais de tempo contínuo: São funções matemáticas que representam informações em todos os instantes do tempo.

- Sinais de tempo discreto: São sequências de valores que são definidos apenas em alguns instantes no tempo.
- Sinais determinísticos: são sinais cujo comportamento é completamente previsível e pode ser descrito por uma equação.
- Sinais aleatórios: são sinais cujo comportamento não pode ser totalmente previsto devido à presença de componentes aleatórios. Esses sinais são modelados por processos estocásticos e podem variar de forma imprevisível ao longo do tempo.
- Sinais limitados no tempo: Sinais que não são periódicos e possuem uma duração finita.
- Sinais limitados em amplitude: Apenas existe para um valor M tal que $|x(t)| < M$ para todo t , esses sinais são limitados em amplitude.
- Sinais fisicamente realizáveis: São sinais que na prática há medição em laboratório.

Como vimos na sessão 2.1, a onda acústica gerada por qualquer navio ou meio pode ser representada por um sinal de áudio, este por meio de uma correlação de grandezas pode ser representado por um sinal elétrico de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 1 - Equivalência entre as grandezas eletroacústicas [20]

GRANDEZAS ACÚSTICAS		GRANDEZAS ELÉTRICAS			
NOME	FÓRMULA	NOME	FÓRMULA		
Intensidade	I=	Potência	P=	pu	Vi
				ρcu^2	Ri^2
				$\frac{p^2}{\rho c}$	$\frac{V^2}{R}$
Pressão	ρcu	Tensão elétrica	$V = Ri$		
Velocidade	u	Corrente	i		
Impedância Acústica	ρc	Resistência	R		

A partir dessa correlação entre grandezas, existem ferramentas matemáticas e de processamentos de sinais para extrair informações sobre esse sinal. Nesta sessão do trabalho iremos explorar as seguintes ferramentas para explorar informações contidas no sinal [21,22]:

- Janelas: Esta técnica é utilizada para aumentar características dos sinais, diminuindo as margens de transição, dessa maneira, reduzindo a perda espectral. Além disso, o janelamento pode modificar o sinal tanto no domínio do tempo quanto na frequência. Neste trabalho serão abordadas as seguintes janelas: Hamming, Hann e Bartlett(triangular).

- Modulação: É uma técnica que envolve a variação de uma ou mais características de um sinal portador em relação a um sinal de informação. Com intuito de transmitir o sinal de informação.

- Decimação: É processo de reduzir a taxa de amostragem de um sinal discreto. Isso significa que é removido algumas das amostras do sinal original.

- STFT (Transformada de Fourier de Tempo Curto): É uma técnica de processamento de sinais usada para analisar e representar as características de frequência de um sinal que muda ao longo do tempo. Consiste em mover uma janela sobre o sinal e obter o espectro de Fourier em função do tempo.

- **TPSW (Two-Pass Split Window):** É utilizado o algoritmo TPSW para normalizar o módulo do espectro. A normalização do espectro refere-se ao processo de ajustar as amplitudes das componentes de frequência em um espectro de um sinal de modo que eles estejam em uma escala específica. Dessa maneira, usado para estimar o ruído de fundo.
- **Filtragem:** É um processo que consiste em alterar o conteúdo de frequência do sinal para separar em componentes desejáveis e retirar os ruídos.
- **Reamostragem:** Quando os sinais de entrada não possuem a mesma frequência de amostragem, é necessário comprimir todos os sinais para que eles tenham a frequência do sinal com menor frequência. Dessa maneira, alterando a taxa de amostragem de um sinal discreto.

2.6 ANÁLISE DEMON

[21] É uma técnica utilizada no ambiente submarino para detecção e classificação de um alvo e por meio de análise de sinais acústicos passivos, são utilizadas ferramentas matemáticas para extração de informações desse sinal.

Nesta análise é utilizada um filtro de banda estreita, no domínio da frequência que fará a modulação de um efeito que ocorre nos eixos de navios chamado cavitação, ilustrado pela Figura 12. Este processo ocorre quando o hélice gira na água, e devido a diferença de pressão entre a parte anterior da pá do hélice e a parte posterior, há formação de bolhas, com a implosão devido ao fluxo de água e emitem um pulso de som. Dessa maneira, com auxílio do operador sonar, conseguimos inferir a rotação por minuto (RPM) do hélice propulsor do contato e quantidade de pás de cada hélice.



Figura 12 – Fenômeno de Cavitação no Hélice, fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

O processo de análise DEMON envolve a gravação de sinais sonoros por hidrofones (microfones subaquáticos) e a extração de características acústicas desses sinais, após é comparada com o banco de dados já existente. Na figura a seguir, é possível verificar o diagrama em blocos da análise DEMON:

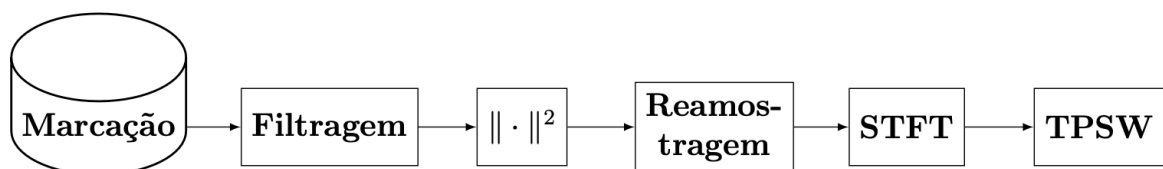


Figura 13 -Diagrama em Blocos da Análise Demon [22]

Com o processamento desse sinal, este sinal é apresentado de acordo com o demograma Figura 14, a partir do acompanhamento temporal do espectro.

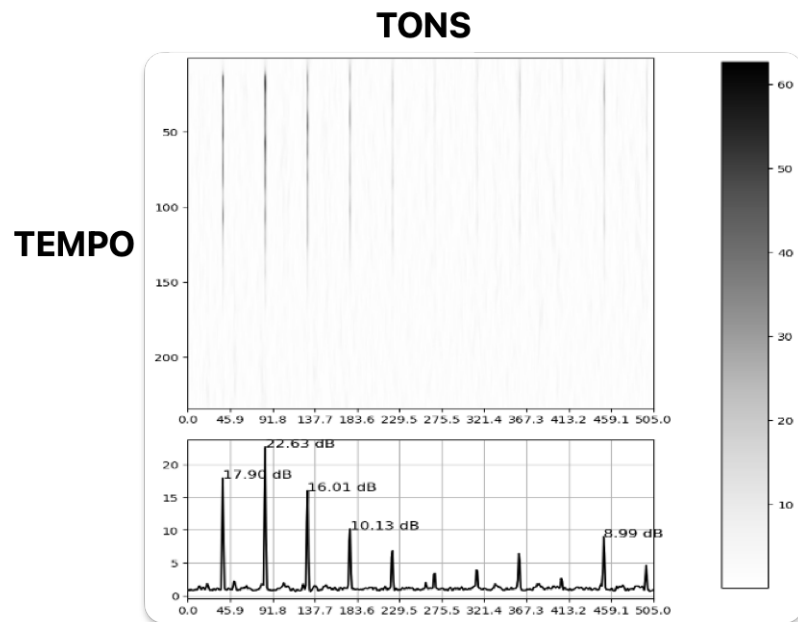


Figura 14 – Demograma, fonte: Autor

2.7 ANÁLISE LOFAR

[22] Análise utilizada para identificação de sons emitidos por navios, como ruídos de máquinas e hidrodinâmicos. Estes, oferecem uma informação específica que é possível a detecção, localização e classificação do alvo. Além disso, representa a análise do ruído irradiado pelo alvo, com isso, é possível obter sua “assinatura acústica”. A Figura 15 exemplifica o digrama de blocos básico de um processamento LOFAR:

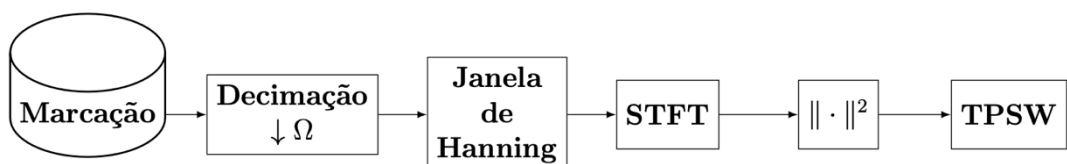


Figura 15 - Diagrama em Blocos Análise LOFAR [22]

[23] A análise trabalha no domínio da frequência que variam de 0 a 2400 Hz, utilizando filtro de banda larga. Dessa maneira, como são frequências mais baixas, aumentam demasiadamente a distância para captação de contatos. Após todo o processamento do sinal, o Lofargrama pode ser representado de acordo com a Figura 16.

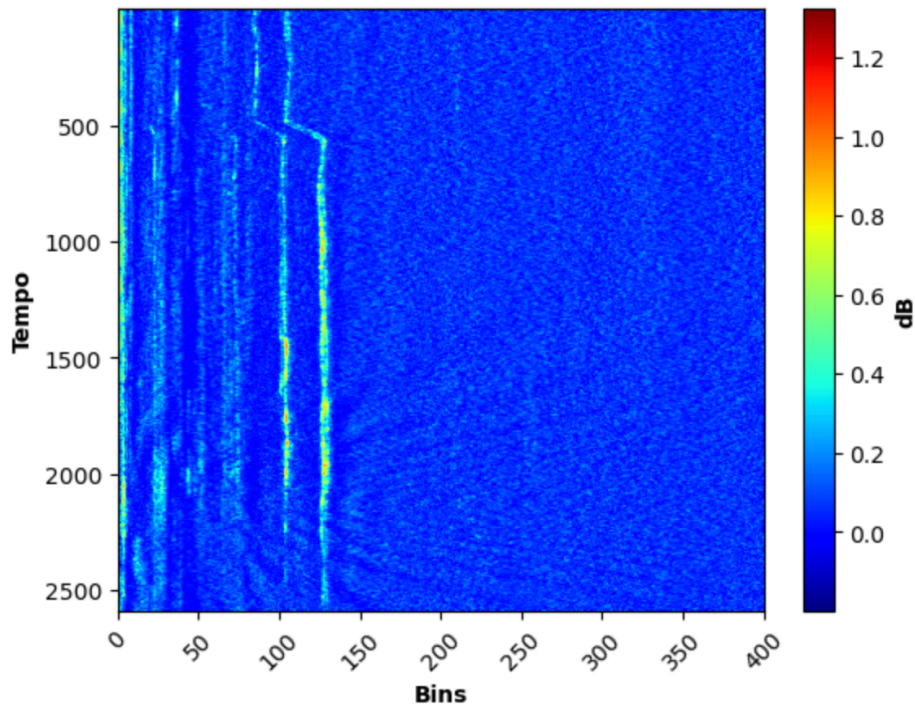


Figura 16 – Lofargrama, fonte: Autor

2.8 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS

Para analisar os dados de como os parâmetros nos blocos de processamento do LOFAR influenciam em sua classificação, é necessário o uso de ferramentas estatísticas como:

- Variável Aleatória;
- Função Densidade de Probabilidade;
- Divergência.

[24] Uma variável aleatória representa o espaço de amostras, com conjunto de todos os possíveis valores dessa variável. Vale ressaltar, que nem sempre são números, dessa maneira, uma variável aleatória possui o papel de mapear os resultados em um processo estocástico que permite associar valores numéricos a eventos ou resultados que podem ocorrer em um experimento incerto.

Variáveis aleatórias podem ser discretas, assumindo valores específicos, como o resultado de um lançamento de dados, ou contínuas, representando de valores em um intervalo, como a altura de indivíduos. Elas são essenciais para modelar fenômenos incertos e desempenham um papel em diversas áreas, como a engenharia elétrica.

Estas variáveis aleatórias podem ser descritas por funções de densidade e probabilidade particularmente associado a variáveis aleatórias contínuas. Ela descreve a distribuição de probabilidade dos valores possíveis que uma variável aleatória contínua pode assumir. Existem diversas funções utilizadas a mais comum seria a Distribuição Gaussiana, representada pela equação a seguir:

$$P_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Eq. (8)

- $P_x(x)$ representa a função de probabilidade da variável aleatória
- μ , média da distribuição normal
- σ , desvio padrão.

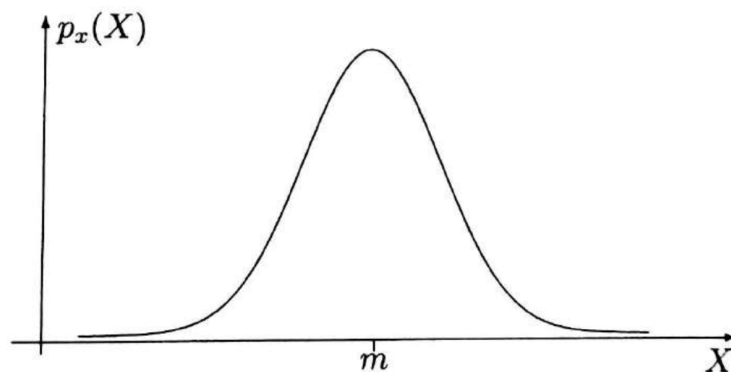


Figura 17 – Gaussiana, [24]

Além disso, toda a análise LOFAR é representada no espaço de variável aleatória, com isso, é possível obter sua função de densidade e probabilidade, no capítulo 3, serão abordados materiais e métodos para verificar como cada parâmetro influencia. Com isso, essa função de densidade de probabilidade será comparada através de ferramentas.

[25] A ferramenta de comparação será a divergência, que mede a quase distância e similaridade entre duas funções de densidade e probabilidade, esta função possui diversas famílias para cada aplicação. Neste trabalho, focaremos na Divergência de Kullback-Leibler, também, conhecida como divergência KL, pode ser representado matematicamente da seguinte forma:

$$D_{KL}(P_x \parallel P_y) = \sum_{i=1}^N P_x(i) \log\left(\frac{P_x(i)}{P_y(i)}\right)$$

Eq. (9)

Vale ressaltar, que a divergência KL não é simétrica, ou seja, $D_{KL}(P_x \parallel P_y) \neq D_{KL}(P_y \parallel P_x)$, então não pode ser considerada uma métrica.

3 MATERIAS E METÓDOS

A partir da técnica LOFAR usaremos o teste de divergência KL para avaliar em águas rasas qual modelo tem maior capacidade para separar os navios em classes distintas. O estudo incluirá a modificação das janelas e STFT nos parâmetros do diagrama em bloco. Os navios estão ordenados de acordo com a imagem a seguir:

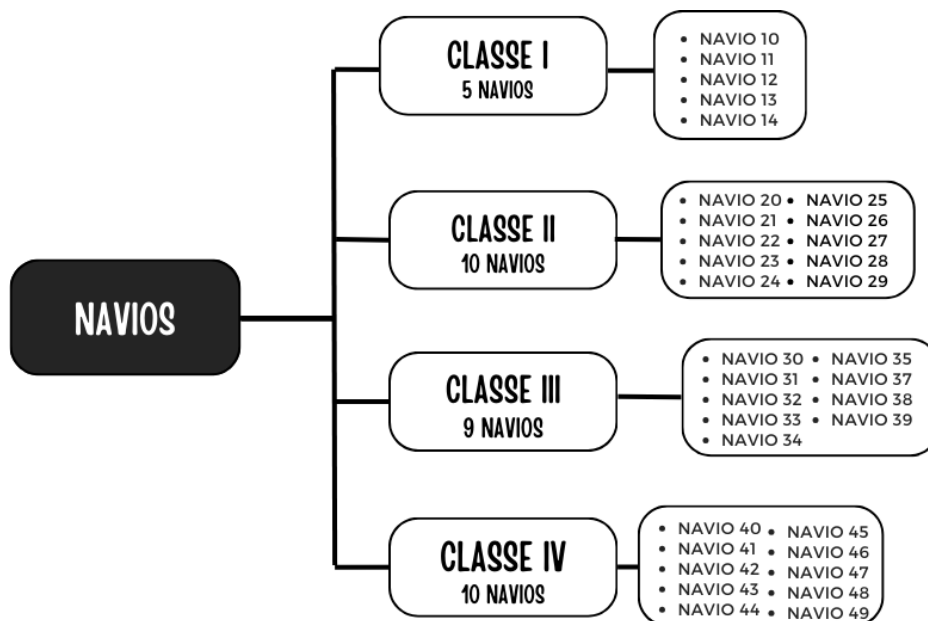


Figura 18 - Navios e Classes, fonte: Autor

Ao ajustar os parâmetros e observar como essas alterações afetam o teste de divergência KL, este trabalho visa proporcionar uma compreensão das configurações ideais para a análise LOFAR em aplicações de detecção e classificação de navios em ambientes marítimos. Serão realizadas 4 análises LOFAR distintas em todas as classes de navio, cada análise com sua mudança de parâmetro. A imagem 19 exemplifica como o trabalho será abordado:

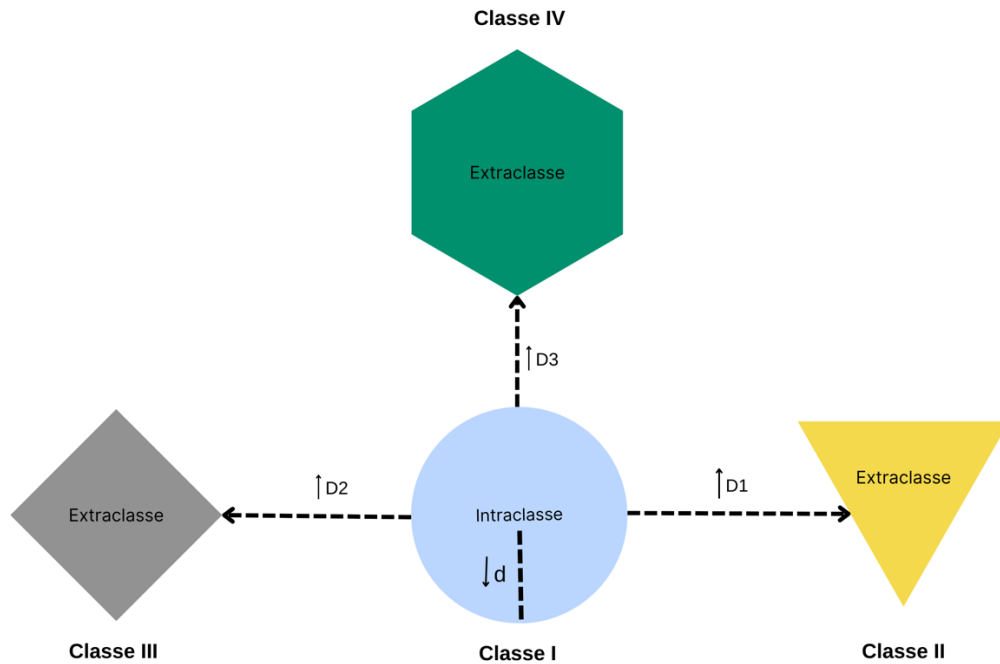


Figura 19 - Separação de classes, fonte: Autor

O teste de divergência KL será usado para maximizar “d” e minimizar “D”, dessa maneira, é possível verificar qual modelo de análise possui maior capacidade de distinção em águas rasas. Para maximizar o valor de “d”, será realizado o teste de divergência KL com todas as combinações possíveis de navios da mesma classe, dentre o resultado, será usado o maior valor. Dessa forma, para minimizar “D”, será realizado o mesmo teste em classes distintas de navio, e será usado o menor valor. A partir disso, verificaremos se é possível separar as classes através do Teste de Divergência KL.

Os 4 modelos de análise LOFAR estão de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 - Análises LOFAR

	DECIMAÇÃO	JANELA	STFT	MODULAÇÃO	TPSW	QUANTIDE DE BINS	OVERLAP
LOFAR I	1	HANN	1024	AMPLITUDE	8 picos / 2 vales	400	0.5
LOFAR II	1	BARTLETT	1024	AMPLITUDE	8 picos / 2 vales	400	0.5
LOFAR III	1	HAMMING	1024	AMPLITUDE	8 picos / 2 vales	400	0.5
LOFAR IV	1	HANN	2048	AMPLITUDE	8 picos / 2 vales	400	0.5

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são abordados os resultados dos conjuntos de dados de cada análise LOFAR descritas, seus resultados serão comparados entre si e será apresentado como cada parâmetro influência na separação de classes. Cada tabela representa sua LOFAR e as distâncias “d” e “D” separadas por classes, como mencionado na Figura 19.

Dessa maneira, ao analisarmos as Tabelas 3, 4 e 5, onde são modificados apenas as janelas, constatamos que apenas há uma diferença sutil em “D” e “d”, comparando-as entre si. Além disso, não foi possível separar os navios em classes distintas, pois “D” < “d”. Entretanto, quando analisamos as Tabelas 3 e 6, onde é modificado o parâmetro STFT para 2048, verificamos que há a possibilidade de separar a Classe III da Classe IV, pois “D” > “d”.

Tabela 3 - Resultados LOFAR I – HANN

LOFAR I - HANN			
CLASSE I		CLASSE II	
d = 0,4823	(D) CLASSE II = 0,2742	d = 0,7472	(D) CLASSE I = 0,2729
	(D) CLASSE III = 0,3502		(D) CLASSE III = 0,3477
	(D) CLASSE IV = 0,3794		(D) CLASSE IV = 0,3036
CLASSE III		CLASSE IV	
d = 0,8355	(D) CLASSE I = 0,3661	d = 0,9665	(D) CLASSE I = 0,3811
	(D) CLASSE II = 0,3606		(D) CLASSE II = 0,2907
	(D) CLASSE IV = 0,4271		(D) CLASSE III = 0,3774

Tabela 4 - Resultados LOFAR II – BARTLETT

LOFAR II – BARTLETT			
CLASSE I		CLASSE II	
d = 0,4790	(D) CLASSE II = 0,2811	d = 0,7367	(D) CLASSE I = 0,2834
	(D) CLASSE III = 0,3566		(D) CLASSE III = 0,3471
	(D) CLASSE IV = 0,3519		(D) CLASSE IV = 0,3008
CLASSE III		CLASSE IV	
d = 0,8619	(D) CLASSE I = 0,3730	d = 0,9606	(D) CLASSE I = 0,3788
	(D) CLASSE II = 0,3674		(D) CLASSE II = 0,3140
	(D) CLASSE IV = 0,4446		(D) CLASSE III = 0,3847

Tabela 5 - Resultados LOFAR III – HAMMING

LOFAR III – HAMMING			
CLASSE I		CLASSE II	
d = 0,4759	(D) CLASSE II = 0,2776	d = 0,7514	(D) CLASSE I = 0,2788
	(D) CLASSE III = 0,3592		(D) CLASSE III = 0,3509
	(D) CLASSE IV = 0,3496		(D) CLASSE IV = 0,3026
CLASSE III		CLASSE IV	
d = 0,8520	(D) CLASSE I = 0,3747	d = 0,9606	(D) CLASSE I = 0,3829
	(D) CLASSE II = 0,3677		(D) CLASSE II = 0,3118
	(D) CLASSE IV = 0,4344		(D) CLASSE III = 0,3906

Tabela 6 - Resultados LOFAR IV - STFT 2048

LOFAR IV – STFT 2048			
CLASSE I		CLASSE II	
d = 0,2411	(D) CLASSE II = 0,1371	d = 0,3736	(D) CLASSE I = 0,1364
	(D) CLASSE III = 0,1751		(D) CLASSE III = 0,1738
	(D) CLASSE IV = 0,1897		(D) CLASSE IV = 0,1518
CLASSE III		CLASSE IV	
d = 0,4177	(D) CLASSE I = 0,3747	d = 0,4832	(D) CLASSE I = 0,3829
	(D) CLASSE II = 0,3677		(D) CLASSE II = 0,3118
	(D) CLASSE IV = 0,4344		(D) CLASSE III = 0,3906

Isto pode ocorrer, pois aumentando o tamanho da janela da STFT resulta em uma maior resolução de frequência, mas uma menor resolução de tempo, por fatores em que a transformada de Fourier é calculada em janelas de tempo maiores, o que permite uma análise mais precisa das diferentes frequências do sinal.

No entanto, como as janelas de tempo são maiores, perde-se a capacidade de capturar mudanças rápidas no sinal ao longo do tempo. Portanto, um aumento no tamanho da janela STFT permite identificar melhor as frequências presentes no sinal, mas pode tornar mais difícil detectar eventos de curta duração no sinal.

5 CONCLUSÃO

Portanto, o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuos de técnicas de classificação de contatos submarinos aprimoram a eficácia da MB, mas também contribuem para o aumento da segurança, permitindo uma identificação precisa de ameaças e potenciais intrusos.

Com base nos resultados das análises dos conjuntos de dados LOFAR em águas rasas apresentados nas tabelas, é possível considerar que a modificação das janelas HANN, HAMMING e BARTLETT de análises não trouxeram mudanças significativas nas métricas "D" e "d" de separação entre as classes. De fato, a sutil diferença observada nas métricas "D" e "d" ao variar as janelas sugere que esse parâmetro em particular pode não ser crítico na distinção eficaz entre as classes em questão.

No entanto, a análise das tabelas 3 e 6, onde o parâmetro STFT foi modificado para 2048, revelou uma maior diferença. A capacidade de separar a Classe III da Classe IV foi aprimorada, visto que "D" superou "d". Isso sugere que o parâmetro STFT, quando configurado adequadamente, pode desempenhar um papel significativo na distinção efetiva entre as classes de interesse.

Portanto, com base nessas observações, podemos concluir que o parâmetro STFT tem uma influência na separação de classes nos conjuntos de dados LOFAR. Enquanto a variação nas janelas de análise mostrou ter um impacto limitado.

Dessa maneira, o ajuste apropriado do parâmetro STFT pode aumentar a capacidade de distinguir diferentes classes, o que é fundamental para o sucesso de análises de dados. Isso destaca a importância da consideração cuidadosa dos parâmetros de processamento de sinal ao realizar tarefas de classificação ou separação de classes com base em dados LOFAR.

Como sugestões para trabalhos futuros, proponho outras mudanças nos parâmetros em bloco como retirada da TPSW e após todos as análises de divergência KL, incluir um classificador com rede neural para ratificar o que foi encontrado através da análise estatística.

Dessa forma, a mentalidade na guerra acústica desempenha um papel crítico na capacidade das forças navais de se adaptarem às ameaças submarinas em constante evolução. Além de tecnologias avançadas, a compreensão profunda dos princípios acústicos e a habilidade de pensar estrategicamente são essenciais. Uma mentalidade focada na inovação contínua é fundamental, pois permite o desenvolvimento de novas estratégias de detecção e classificação de contatos, garantindo a segurança e a eficácia das operações navais.

REFERÊNCIAS

- [1] BARROS, M. “Importância da Força de Submarinos no país”
Dezembro 2022, Disponível em: <https://www.defesaemfoco.com.br/importancia-da-forca-de-submarinos-no-pais/>. Acesso em: 07 junho 2023.
- [2] DO BRASIL, M. “PROSUB”, Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub>. Acesso em: 12 junho 2023.
- [3] PEREIRA, Eudes. Os Primeiros Submarinos. Revista Villegagnon, Rio de Janeiro, Volume III, p. (128 - 131), 2008.
- [4] DO BRASIL, M. “A Ideia do Submarino na Marinha do Brasil” Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/comfors/?q=node/41>. Acesso em: 20 julho 2023.
- [5] DO BRASIL, M. “**Amazônia Azul**” Disponível em: https://www.marinha.mil.br/cgcf/amazonia_azul. Acesso em: 22 julho 2023.
- [6] DO BRASIL, M. “SisGAAz: Proteção e Monitoramento das Águas Jurisdicionais Brasileiras.” Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sisgaaz-protecao-e-monitoramento-das-aguas-jurisdicionais-brasileiras>. Acesso em: 12 agosto 2023.
- [7] WAITE, A. D. **Sonar for Practising Engineers**. 3rd ed. Chichester: Wiley & Sons, 1998
- [8] MIGUENS, Altineu Pires. **Navegação: A Ciência e a Arte. Vol. 3: Navegação Eletrônica e em Condições Especiais**. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Rio de Janeiro, 2000. 878p;
- [9] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Vol. 2: Fundamentos de Física**. 10ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2015.
- [10] CLAY, C. S.; MEDWIN H. **Acoustical Oceanography: Principles and Applications**. New York, USA, John Wiley & Sons, 1977.
- [11] MURMEL, G. **DoA Estimation Performance of UCAs with Reduced Number of Sensors using Phase-Mode Transformation and Small Sample Support**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2022.
- [12] URICK, Robert J, **Principles of Underwater**, 3rd ed, McGraw- Hill Book Company, United States of America, 1983.
- [13] ROSS, D. **Mechanics of underwater noise**. 2 ed. Washington, D.C., Pergamon Press, 1976.
- [14] DE SOUZA, A. V. G. **Estimação de distância de fontes sonoras no mar com técnicas acústicas passivas**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

- [15] HODGES, R. P. **Underwater Acoustics - Analysis, design and performance of sonar**. 1 ed. United Kingdom, John Wiley & Sons, 2010.
- [16] WIKIPÉDIA, T. O.; LIVRE, A. E. História do sonar. Disponível em: https://igeo.ufrgs.br/museudetopografia/images/acervo/artigos/Histria_do_Sonar.pdf. Acesso em: 17 setembro 2023.
- [17] GOLTZ, G. A. M. **Classificação de navios com uso de sinais de sonar passivo**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- [18] COSTA, E. S **Utilização de parâmetros acústicos para quantificação de parâmetros hidrológicos**. Tese de D.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.
- [19] Tokio Higuti, Ricardo; Kitano, Cláudio (2003). *SINAIS E SISTEMAS*. Ilha Solteira – SP: UNESP
- [20] MARTINS, C. A. O. **Calibração de transdutores hidroacústicos pelo método da reciprocidade empregando salvas de sinais de excitação monotônicos e de frequência modulada**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [21] MOURA, N. N. **Detecção e classificação de sinais de sonar passivo usando método de separação cega de fontes**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- [22] DE MOURA JÚNIOR, N. N. **Detecção de novidade para sistemas de sonar passivo**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [23] SOUZA, M.J; JÚNIOR, N.N.M; SEIXAS, J.M; ALCÂNTARA, C.C.M.P; SILVA, F.O.B; SILVA, V.A. **Classificação de sinais de sonar passivo no domínio do tempo e da frequência utilizando redes neurais profundas**. Revista Pesquisa Naval, Rio de Janeiro, p. (56-66), 2022.
- [24] ALBUQUERQUE, J.P.A; FORTES, J.M.P; FINAMORE, W.A. **Probabilidade, variáveis aleatórias e processos estocásticos**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Interciência. 3 de dezembro de 2018.
- [25] KULLBACK, S., LEIBLER, R. A. “**On Information and Sufficiency**”, Ann. Math. Statist., 1951.

ANEXO

Código cedido pelo Professor Doutor Natanael Nunes de Moura Júnior (UFRJ):

IMPORTANDO BIBLIOTECAS

```
import os
import pandas as pd
import numpy as np
import warnings
import math
import librosa
import IPython
import math
import warnings
from scipy.signal import cheb2ord, cheby2, convolve, decimate, hilbert, lfilter, spectrogram
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.legend_handler import HandlerLine2D
from scipy.stats import wasserstein_distance
from librosa import fft_frequencies, frames_to_time, stft
import soundfile as sf
```

FUNÇÃO TPSW

```
def tpsw(signal, npts=None, n=None, p=None, a=None):
    """
    Filtra um sinal de áudio usando a técnica TPSW.

    Args:
        signal (numpy.ndarray): O sinal de áudio de entrada.
        npts (int, optional): O número de pontos no sinal.
        n (int, optional): O parâmetro 'n' para a técnica TPSW.
        p (int, optional): O parâmetro 'p' para a técnica TPSW.
        a (float, optional): O parâmetro 'a' para a técnica TPSW.

    Returns:
        numpy.ndarray: O sinal de áudio filtrado.
```

```

"""

# Faz uma cópia do sinal de entrada para evitar alterações indesejadas.
x = np.copy(signal)

# Verifica a dimensão do sinal e adiciona uma dimensão se necessário.
if x.ndim == 1:
    x = x[:, np.newaxis]

# Configura valores padrão para os parâmetros se não forem fornecidos.
if npts is None:
    npts = x.shape[0]
if n is None:
    n = int(round(npts * 0.04 / 2.0 + 1))
if p is None:
    p = int(round(n / 8.0 + 1))
if a is None:
    a = 2.0

# Cria uma janela TPSW apropriada com base nos parâmetros 'n' e 'p'.
if p > 0:
    h = np.concatenate((np.ones((n - p + 1)), np.zeros(2 * p - 1), np.ones((n - p +
1))), axis=None)
else:
    h = np.ones((1, 2 * n + 1))
    p = 1

# Normaliza a janela.
h /= np.linalg.norm(h, 1)

# Define uma função para aplicar a janela no espectro.
def apply_on_spectre(xs):
    return convolve(h, xs, mode='full')

# Aplica a janela no espectro do sinal.
mx = np.apply_along_axis(apply_on_spectre, arr=x, axis=0)

# Calcula a defasagem do filtro.
ix = int(np.floor((h.shape[0] + 1) / 2.0))

# Corrige a defasagem no espectro.
mx = mx[ix - 1:npts + ix - 1]

```

```

# Corrige os pontos extremos do espectro.
ixp = ix - p
mult = 2 * ixp / np.concatenate([np.ones(p - 1) * ixp, range(ixp, 2 * ixp + 1)],
axis=0)[:, np.newaxis]
mx[ix, :] = mx[ix, :] * (np.matmul(mult, np.ones((1, x.shape[1])))) # Pontos iniciais
mx[npts - ix:npts, :] = mx[npts - ix:npts, :] * np.matmul(np.flipud(mult), np.ones((1,
x.shape[1]))) # Pontos finais

# Elimina picos para a segunda etapa da filtragem.
indl = (x - a * mx) > 0

# Aplica o filtro TPSW.
x = np.where(indl, mx, x)

# Aplica novamente a janela no espectro do sinal.
mx = np.apply_along_axis(apply_on_spectre, arr=x, axis=0)
mx = mx[ix - 1:npts + ix - 1, :]

# Corrige pontos extremos do espectro.
mx[ix, :] = mx[ix, :] * (np.matmul(mult, np.ones((1, x.shape[1])))) # Pontos iniciais
mx[npts - ix:npts, :] = mx[npts - ix:npts, :] * (np.matmul(np.flipud(mult), np.ones((1,
x.shape[1]))) # Pontos finais

# Se o sinal de entrada tinha apenas uma dimensão, retorna uma matriz
unidimensional.
if signal.ndim == 1:
    mx = mx[:, 0]

# Retorna o sinal de áudio filtrado.
return mx

```

FUNÇÃO LOFAR

```

def lofar(data, fs, n_pts_fft=1024, n_overlap=0.5,
          spectrum_bins_left=None, **tpsw_args):
    """
    Calcula o espectrograma LOFAR de um sinal de áudio.

    Args:
        data (numpy.ndarray): O sinal de áudio de entrada.
        fs (float): A taxa de amostragem do sinal.
        n_pts_fft (int, optional): O número de pontos na FFT (Transformada Rápida de
        Fourier).
    """

```

```

    n_overlap (int, optional): O número de pontos de sobreposição entre janelas no
    cálculo do espectrograma.
    spectrum_bins_left (int, optional): O número de bins no espectro a ser mantido.
    **tpsw_args: Outros argumentos que são passados para a função tpsw.

Returns:
    tuple: Uma tupla contendo o espectrograma, as frequências e os tempos.

"""

if not isinstance(data, np.ndarray):
    raise NotImplementedError # Verifica se o argumento 'data' é uma instância de
'numpy.ndarray'.

# Calcula o espectrograma do sinal de entrada.
freq, time, power = spectrogram(data,
                                window=('bartlett'),
                                nperseg=n_pts_fft,
                                noverlap=n_overlap,
                                nfft=n_pts_fft,
                                fs=fs,
                                detrend=False,
                                axis=0,
                                scaling='spectrum',
                                mode='magnitude')

# Corrige temporariamente o espectrograma para áudio estéreo.
if power.ndim == 3:
    power = power.mean(axis=1)
    power = power.squeeze()

# Transforma o espectrograma em magnitude.
power = np.absolute(power)

# Aplica algum tipo de processamento usando a função 'tpsw'.
power = power / tpsw(power)

# Calcula o logaritmo em base 10 do espectrograma.
power = np.log10(power)

# Define valores menores que -0.2 como zero.
power[power < -0.2] = 0

```

```

# Ajusta o número de bins e frequências com base em 'spectrum_bins_left'.
if spectrum_bins_left is None:
    spectrum_bins_left = power.shape[0] * 0.8
power = power[:spectrum_bins_left, :]
freq = freq[:spectrum_bins_left]

# Transpõe o espectrograma para a forma correta e retorna.
return np.transpose(power), freq, time

```

FUNÇÃO PARA CÁLCULO DE DIVERGÊNCIA KL

```

def kl_divergence(p,q):
    result = np.zeros_like(p)
    for i,value in enumerate(p):
        if ((p[i]==0) or (q[i]==0)):
            continue
        else:
            result[i]= p[i]*np.log(p[i]/q[i])
    return np.sum(result)

```

PLOTAGEM DO GRÁFICO DE DIVERGÊNCIA KL POR BIN

```

p = lofar_signal
q = lofar_signal1

num_bins = 400

kl1_div = np.zeros([num_bins])
kl2_div = np.zeros([num_bins])

wass_dist = np.zeros([num_bins])

for selected_bin in range(400):
    m_min =
np.min([np.min(lofar_signal[:,selected_bin]),np.min(lofar_signal1[:,selected_bin])])
    m_max =
np.max([np.max(lofar_signal[:,selected_bin]),np.max(lofar_signal1[:,selected_bin])])
    bins = np.linspace(m_min,m_max,30)

    [pdf_1,bins,patches] = ax1.hist(lofar_signal[:,selected_bin],bins=bins, density = True)
    [pdf_2,bins,patches] = ax2.hist(lofar_signal1[:,selected_bin],bins=bins, density =
True)

```

```

kl1_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_1,pdf_2)
kl2_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_2,pdf_1)
#epsilon = 1e-10 # Um valor muito pequeno
#kl1_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_1, pdf_2 + epsilon)
#kl2_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_2, pdf_1 + epsilon)

plt.plot(kl1_div, 'b',linewidth=2.0,alpha = 0.5,label = 'LOFAR')
plt.plot(kl2_div, 'r',linewidth=2.0,alpha = 0.5,label = 'LOFAR-1')
plt.legend(loc='best')
plt.show()

print(kl_divergence(pdf_1,pdf_2))
print(kl_divergence(pdf_2,pdf_1))
print(wasserstein_distance(pdf_1,pdf_2))

```

CÁLCULO DE DIVERGÊNCIA KL ENTRE NAVIOS

```

# Nova carga de arquivos
import os
from os import walk

database = '4classes' # 4classes or shipsEar

# uma pasta por classe.

file_folder = "/Users/matheusgomes/Documents/jupyter/" # alterar para o ponto
onde os dados crus estão a

file_path = os.path.join(file_folder, database)

dict_classes = {} # dicionario com todos os nomes dos arquivos organizados

f = []
for (dirpath, dirnames, filenames) in walk(top=file_path,topdown=True):
    if filenames == []: # lista de arquivos vazia
        continue
    filenames.sort()
    dict_classes[dirpath.split('/')[-1]] = {}
    for filename in filenames:
        dict_classes[dirpath.split('/')[-1]][filename.split('.')[0]] =
os.path.join(dirpath,filename)

```

```

# célula onde o processamento realizada
df_all_data = None

for iclass in dict_classes.keys():
    for irun in dict_classes[iclass].keys():
        df_run = pd.DataFrame()
        #print(dict_classes[iclass][irun].split('.'))
        if dict_classes[iclass][irun].split('.')[1] == 'wav':
            signal, fs = sf.read(dict_classes[iclass][irun])
        else:
            print('Não está no formato correto')
            continue

        decimate_ratio = 1 #1, 3, 4
        if decimate_ratio != 1:
            signal = decimate(signal,decimate_ratio)

        lofar_signal, freq, time = lofar(data=signal,fs=fs, n_pts_fft=1024,
                                       n_overlap=0.0, spectrum_bins_left=400)
        print('Processing Class: %s - Run: %s'%(iclass,irun))
        df_run['fs'] = fs*np.ones([lofar_signal.shape[0]])
        df_run['filename'] = dict_classes[iclass][irun]
        df_run['run'] = irun
        df_run['class'] = iclass
        df_lofar_signal = pd.DataFrame(lofar_signal)
        df_lofar_signal = df_lofar_signal.add_prefix('bin_')
        df_run = pd.concat([df_run, df_lofar_signal], axis=1)
        if df_all_data is None:
            df_all_data = df_run
        else:
            df_all_data = pd.concat([df_all_data,df_run],axis=0, ignore_index=True)

number_runs_i = df_all_data[df_all_data['class']=='Class4']['run'].unique().shape[0]
number_runs_j = df_all_data[df_all_data['class']=='Class3']['run'].unique().shape[0]
mat_kl_intra = -999*np.ones([number_runs_i, number_runs_j])

i = 0
j = 0

for intra_class_i in df_all_data[df_all_data['class']=='Class4']['run'].unique():
    j= 0
    for intra_class_j in df_all_data[df_all_data['class']=='Class3']['run'].unique():
        print('Comparar %s com %s'%(intra_class_i, intra_class_j))

```

```

p = df_all_data[df_all_data['run']==intra_class_i].filter(like='bin_').values
q = df_all_data[df_all_data['run']==intra_class_j].filter(like='bin_').values

num_bins = 400

kl1_div = np.zeros([num_bins])
kl2_div = np.zeros([num_bins])

wass_dist = np.zeros([num_bins])

for selected_bin in range(num_bins):
    m_min = np.min([np.min(p[:,selected_bin]),np.min(q[:,selected_bin])])
    m_max = np.max([np.max(p[:,selected_bin]),np.max(q[:,selected_bin])])
    bins = np.linspace(m_min,m_max,30)

    #[pdf_1,bins,patches] = np.histogram(p[:,selected_bin],bins=bins, density =
True);
    #[pdf_2,bins,patches] = np.histogram(q[:,selected_bin],bins=bins, density =
True);
    pdf_1, bins = np.histogram(p[:, selected_bin], bins=bins, density=True)
    pdf_2, _ = np.histogram(q[:, selected_bin], bins=bins, density=True)

    kl1_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_1,pdf_2)
    kl2_div[selected_bin] = kl_divergence(pdf_2,pdf_1)
    mat_kl_intra[i,j] = np.sum(kl1_div)
    j +=1
    i +=1

```
