



# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



André Rodrigues Dias

## Vigilância acústica nos espaços marítimos nacionais

Implementação de uma barreira acústica

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,  
na especialidade de Marinha



Alfeite  
2023





# ESCOLA NAVAL

*ta tant de bi faire*



**André Rodrigues Dias**

*Vigilância acústica nos espaços marítimos nacionais*

*Implementação de uma barreira acústica*

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade em Marinha**

**Orientação de: Professor Doutor Victor José de Almeida e Sousa Lobo**

**Co-orientação de: Professor Doutor Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos  
Professor Doutor João Eduardo Nascimento Costa**

O Aluno Mestrando

O Orientador

---

André Rodrigues Dias

---

Victor Sousa Lobo

**Alfeite**

**2023**



*The purpose of a university education is the achievement of a particular expansion of outlook, turn of mind, habit of thought and capacity for social and civic interaction.*

John Newman, *The idea of a University*



À minha família que tudo fez por mim para ser o Homem que sou hoje.



## **AGRADECIMENTOS**

Os meus maiores agradecimentos ao meu orientador, Professor Doutor Victor José de Almeida e Sousa Lobo, por todos os conhecimentos transmitidos, pela total disponibilidade, pelo incentivo à qualidade e por estar sempre pronto a guiar-me no rumo certo.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos, por ter sido um pilar fundamental na elaboração desta dissertação. A sua inestimável dedicação, compreensão, preocupação e vontade em bem fazer foram fundamentais para superar todos os obstáculos que surgiram ao longo do trabalho.

À Escola Naval, em particular, aos camaradas do curso “CALM Manuel Armando Ferraz” pelas experiências e aprendizagens proporcionadas ao longo destes 5 anos.

Aos oficiais do NRP Mondego por contribuírem e fazerem parte do meu processo de aprendizagem.

À minha família e amigos, por todo o apoio desmedido.

A todos que se cruzaram comigo ao longo destes anos, o meu muito obrigado.



## RESUMO

Com o fim da Guerra fria, o interesse pela guerra submarina diminuiu drasticamente. Contudo, recentes desenvolvimentos em veículos não tripulados e vigilância acústica ativa e passiva trouxeram a guerra submarina de volta ao centro das atenções. A guerra anti-submarina é uma das principais preocupações de uma marinha uma vez que é difícil detetar um submarino no vasto oceano. Conjugando os recentes desenvolvimentos em veículos não tripulados e vigilância acústica ativa e passiva, podemos realizar uma fusão de dados e aumentar o nosso conhecimento sobre os eventos que ocorrem nas nossas águas.

Os dados processados provenientes de sistemas de vigilância acústica podem potencialmente constituir uma fonte essencial de informações navais. Uma barreira acústica pode efetuar a deteção e classificação de contactos com sucesso. No entanto, estes sistemas requerem pessoal altamente qualificado para operar, apresentam uma infraestrutura dispendiosa e são difíceis de implementar e manter. A fusão de dados de várias fontes, e mesmo de sensores de baixo custo com medidas ruidosas, é uma solução promissora, especialmente se a otimização de recursos for uma prioridade. Neste contexto, a presente dissertação pretende ser uma prova de conceito de uma implementação de baixo custo em águas pouco profundas que pode ser facilmente expandida e evoluída para diferentes cenários.

Os testes iniciais de campo e de processamento, que decorreram no exercício *Robotics Exercise (REX) 2022* e *Fibersense*, coordenado pelo Centro de Investigação Naval (CINAV), apresentam resultados promissores, mas há muito a melhorar para aumentar as capacidades e aplicabilidade do sistema.

### **Palavras-chave**

Vigilância, Acústica, Aplicações acústicas, Classificação de sinais múltiplos, Algoritmos de processamento de sinais.

## **ABSTRACT**

With the end of the Cold War, the interest in underwater warfare decreased dramatically. However, recent developments in unmanned vehicles and active and passive acoustic surveillance have brought underwater warfare back to center stage. Anti-submarine warfare is one of the major concerns of a navy since it is difficult to detect an enemy submarine in the vast ocean. Conjugating the recent developments in unmanned vehicles and active and passive acoustic surveillance, we can perform data fusion and increase our knowledge about the events occurring in our waters.

The processed data originating from acoustic surveillance can potentially be an essential source of naval intelligence. An acoustic barrier can perform this detection with success. Still, these systems require highly qualified personnel to operate, present a costly infrastructure, and are hard to implement and maintain. Data fusion from multiple sources, and even from low-cost sensors with noisy measures, is a promising solution, especially if resource optimization is a priority. On this basis, this dissertation is intended to be a proof-of-concept of a low-cost shallow-water implementation that can be easily expanded and evolved for different scenarios.

The initial field and processing tests, that took place in the Robotics Exercise 2022 (REX) and Fibersense exercises, coordinated by the Center for Naval Research (CINAV), show promising results, but there is much room for improvement to increase the system's capabilities and applicability.

### **Keywords**

Surveillance, Acoustics, Acoustic applications, Multiple signal classification, Signal processing algorithms.

# ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	IX
RESUMO .....	XI
ABSTRACT.....	XII
ÍNDICE GERAL .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS .....	XVII
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA .....	1
OBJETO DE ESTUDO E SUA DELIMITAÇÃO .....	2
OBJETIVO .....	4
METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO .....	4
ESTRUTURA .....	6
<b>CAPÍTULO 1- VIGILÂNCIA MARÍTIMA.....</b>	<b>9</b>
1.1 ENQUADRAMENTO CONCETUAL.....	9
1.2 ENQUADRAMENTO ESTRATÉGICO.....	11
1.3 CARATERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE VIGILÂNCIA MARÍTIMA .....	12
<b>CAPÍTULO 2- ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 ACÚSTICA .....	14
<b>2.1.1 Caraterísticas do som .....</b>	<b>15</b>
2.2 ACÚSTICA SUBMARINA .....	17
<b>2.2.1 Velocidade de propagação do som na água .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2 Propagação dos raios sonoros .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3 Fontes de Ruído .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.4 Equação SONAR.....</b>	<b>36</b>
2.3 PROCESSAMENTO DE SINAL.....	38
<b>2.3.1 Teorema da Amostragem.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.2 Transformada de Fourier.....</b>	<b>39</b>
2.4 <i>DIRECTION OF ARRIVAL</i> (DOA) .....	41
2.5 CLASSIFICAÇÃO DE SINAIS ACÚSTICOS .....	44
<b>2.5.1 Classificação Bayesiana.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.2 Classificação Árvores de Decisão .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.3 Classificação Redes Neurais.....</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO 3- VIGILÂNCIA ACÚSTICA.....</b>	<b>55</b>
3.1 HIDROFONE CLÁSSICO DIGITALHYD SR-1 .....	59
3.2 <i>KRAITARRAY</i> .....	60

3.1	CONDUCTIVITY, TEMPERATURE, AND DEPTH (CTD) .....	63
3.2	PROJETOR DE SOM.....	63
3.5	FIBER OPTICS CABLE .....	64
<b>CAPÍTULO 4- RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>		<b>69</b>
4.1	ROBOTICS EXERCISE .....	69
4.1.1	<b>Descrição</b> .....	69
4.1.2	<b>Processamento de dados</b> .....	73
4.1.3	<b>Conclusão</b> .....	75
4.2	FIBERSENSE .....	76
4.2.1	<b>Descrição</b> .....	76
4.2.3	<b>Conclusão</b> .....	84
<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....</b>		<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>89</b>
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>96</b>
APÊNDICE A- CÓDIGO MATLAB KRAITARRAY .....		96
APÊNDICE B- CÓDIGO MATLAB CLASSIFICAÇÃO .....		106
APÊNDICE C- ARTIGO OCEANS 23 IEEE .....		108
.....		112
APÊNDICE D- GRÁFICOS OBTIDOS DA EXPERIMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DAS EM AMBIENTE CONTROLADO .....		114
APÊNDICE E- PLANEAMENTO REX 22 .....		117
.....		118
APÊNDICE F- RELATÓRIO REX 22.....		119
APÊNDICE G- CHECKLIST FIBERSENSE TEST .....		126
.....		138

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- METODOLOGIA ADOTADA .....	5
FIGURA 2- ENQUADRAMENTO DO CSM NO CICLO OODA.....	11
FIGURA 3- MODULAÇÃO DA PRESSÃO AMBIENTE .....	15
FIGURA 4 -INTENSIDADE ACÚSTICA.....	16
FIGURA 5- SENSOR SVP. ....	19
FIGURA 6- EQUIPAMENTO UTILIZADO NO TRABALHO COM CAPACIDADE CTD E SVP.....	20
FIGURA 7- PERFIL GENÉRICO DA VPSA.....	21
FIGURA 8- ESQUEMA DAS LINHAS DE CORRENTE À SUPERFÍCIE DA TENSÃO DO VENTO (LINHAS TRACEJADAS) E DA CORRENTE (LINHAS SÓLIDAS) PARA UMA BACIA OCEÂNICA SIMÉTRICA COM UMA TAXA DE ROTAÇÃO CONSTANTE .....	22
FIGURA 9- IMPACTO DO EFEITO DA TARDE .....	23
FIGURA 11- DISTRIBUIÇÃO ANUAL DA MÉDIA DA SALINIDADE À SUPERFÍCIE.....	24
FIGURA 12-FRENTES DE FASE E RAIOS ACÚSTICOS NUM MEIO COM POUCA VARIAÇÃO DA VPSA	26
FIGURA 13- REPRESENTAÇÃO DA LEI DE SNELL-DESCARTES.....	26
FIGURA 14-LEI DE SNELL-DESCARTES APLICADA À TEORIA DA PROPAGAÇÃO DOS RAIOS ACÚSTICOS	27
FIGURA 15-ESQUEMA DA PROPAGAÇÃO DO RAIOS SONORO .....	28
FIGURA 16- PROPAGAÇÃO NUM MEIO ISOTÉRMICO.....	29
FIGURA 17-PROPAGAÇÃO COM GRADIENTE NEGATIVO.....	30
FIGURA 18- PROPAGAÇÃO COM GRADIENTE POSITIVO.....	30
FIGURA 19- ESPETRO DE FREQUÊNCIAS PRODUZIDOS POR NAVIOS .....	32
FIGURA 20-FORMA TÍPICA DE RUÍDO DE MAQUINARIA .....	33
FIGURA 21-TÍPICO RUÍDO GERADO POR CAVITAÇÃO DOS SUBMARINOS "HAKE" E "HOE" ....	34
FIGURA 22- ESPECTRO COMUM DE BLADE FLUTTERS .....	35
FIGURA 23-PROPELLER WHINE .....	35
FIGURA 24- REPRESENTAÇÃO DE UM SINAL CONTÍNUO SEGUIDO DE UM DISCRETO. ....	38
FIGURA 25-SINAL OBTIDO POR UMA FFT.....	41
FIGURA 26-BEAMFOMER CONVENCIONAL .....	43
FIGURA 27- PASSOS DO DATA MINING.....	45
FIGURA 28-ESTRUTURA TÍPICA DE UMA ÁRVORE DE DECISÃO. ....	49
FIGURA 29- ESQUEMA TÍPICO DE UMA RANDOM FOREST.....	50

FIGURA 30- REDE NEURONAL MULTI CAMADA FEED-FORWARD .....	51
FIGURA 31- ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DE UMA REDE NEURONAL .....	52
FIGURA 32- ILUSTRAÇÃO DO SOSUS E SURTASS. ....	56
FIGURA 33-PROJETO SUB-ECO.....	56
FIGURA 34-DIGITALHYD SR-1.....	59
FIGURA 35-KRAITARRAY.....	60
FIGURA 36- KRAITARRAY. TESTES INICIAIS DE LABORATÓRIO. ....	61
FIGURA 37- ESQUEMA DO ARRAY. ....	62
FIGURA 38- APLICAÇÕES KRAITARRAY. ....	63
FIGURA 39- PROJETOR DE SOM .....	64
FIGURA 40- RASTO DE UM NAVIO SOBRE A TECNOLOGIA DAS UTILIZADA PARA MONITORIZAR CABOS ELÉTRICOS SUBMARINOS.....	65
FIGURA 41-BACKSCATTERING SOBRE UMA VIBRAÇÃO ACÚSTICA .....	66
FIGURA 42-INTERROGADOR DAS.....	67
FIGURA 43- ZONA DE OPERAÇÃO, INCLUINDO AS FIADAS PREVISTAS .....	71
FIGURA 44- PERFIL DA VPSA NO REX22 .....	72
FIGURA 45- CÁLCULO DO DOA UTILIZANDO O GROUND-TRUTH DATA.....	75
FIGURA 45- TESTES EXPERIMENTAIS. ....	76
FIGURA 46- ZONA DE OPERAÇÃO E CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DA IMPLEMENTAÇÃO. .	77
FIGURA 48- DIFERENTES CONFIGURAÇÕES FOC.....	78
FIGURA 49- EXPERIMENTAÇÃO EM AMBIENTE CONTROLADO .....	79
FIGURA 50- ESPECTROGRAMA CHIRP 50-2000HZ .....	80
FIGURA 51- ESPECTROGRAMA TOM PURO CONTÍNUO 400HZ.....	80
FIGURA 52- ESPECTROGRAMA RUÍDO AMBIENTE .....	81
FIGURA 52-TOM PURO CONTÍNUO 400HZ.....	114
FIGURE 53-TOM PURO CONTÍNUO 220 HZ .....	114
FIGURA 54-CHIRP .....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

**AIS-** Automatic Identification System

**ASW-** Anti Submarine Warfare

**AUV-** *Autonomous Underwater Vehicles*

**CINAV-** Centro de Investigação Naval

**CSM-** Conhecimento Situacional Marítimo

**CTD-** *Conductivity, Temperature, Depth*

**DAS-** *Distributed Acoustic Sensing*

**DOA-** *Direction of Arrival*

**EN** -Escola Naval

**EU-** União Europeia

**FAP-** Força Aérea Portuguesa

**FFAA-** Forças Armadas

**FFT-** *Fast Fourier Transform*

**FOC-** *Fiber Optics Cable*

**IH-** Instituto Hidrográfico

**MATLAB-** *MATrix LABoratory*

**MONIZEE-** Sistema de Monitorização e Previsão Operacional da Zona Económica Exclusiva

**NATO-** *North Atlantic Treaty Organization*

**REX-** *Robotics Exercise*

**SOSUS-** *Sound Surveillance System*

**SONAR-** *Sound Navigation and Ranging*

**SVP**- *Sound Velocity Profiler (SVP)*.

**VPSA**- *Velocidade de Propagação do Som na Água*

**VTS**- *Vessel Traffic System*

**WEKA**- *Waikato Environment for Knowledge Analysis*

## **Introdução**

Neste capítulo introdutório contextualizar-se-á a temática desta dissertação, explicando a sua escolha para este trabalho, definindo o seu objeto de estudo e sua delimitação como também o objetivo que é proposto alcançar. No final, serão espelhados os métodos utilizados na prossecução do trabalho bem como como este está estruturado.

## **Enquadramento e justificação do tema**

Portugal tem uma posição geoestratégica marítima privilegiada (Adhitama, 2019) e tem jurisdição sobre uma das maiores zonas marítimas da Europa (Blanco, 2021). É essencial garantir a autoridade e a segurança do Estado neste espaço, através de uma vigilância e fiscalização marítima permanente. Para o conseguir, todos os dados de vigilância obtidos devem ser integrados, processados e disseminados, garantindo a obtenção de conhecimento a partir de sistemas de apoio à decisão.

A probabilidade de deteção de alvos aumenta quando reunimos dados de várias fontes e efetuamos fusão de dados. A fonte primária de dados de alvos de interesse no domínio marítimo é o radar, que funciona através da emissão de ondas eletromagnéticas (Roarty, 2013). No entanto, este tipo de onda pode ser facilmente afetado, por exemplo, por interferências, condições meteorológicas ou a curvatura da terra, tendo um alcance muito limitado quando utilizada debaixo de água (Park, 2015).

Atualmente, a vigilância costeira da maioria dos países baseia-se no *Vessel Traffic System* (VTS)(Hughes,1998) com capacidades de radar e eletro-ópticas.

Nas zonas marítimas com elevada densidade do tráfego de navios, como, por exemplo, esquemas de separação de tráfego ou portos, com as limitações dos sistemas de vigilância existentes, é possível que algumas atividades marítimas escapem ainda à vigilância e ao controlo nacional. As pequenas embarcações ou os submarinos, muitas vezes associadas a ações ilícitas, são exemplos claros de plataformas navais que podem facilmente escapar à vigilância, e este é um problema que tem de ser resolvido,

especialmente com o aumento da atividade submarina inimiga devido aos conflitos armados na Europa de Leste e ao narcotráfico nas nossas costas (Oder, 2018).

A vigilância acústica pode ultrapassar as limitações existentes, uma vez que pode ajudar a detetar e identificar a origem dos sons que se propagam no ambiente marítimo e efetuar múltiplas tarefas, como a classificação da fonte sonora (Zhu, 2018). Se conseguirmos detetar e classificar a fonte sonora, podemos identificar a sua origem e determinar se estamos a lidar com navios ou submarinos indesejados.

Em suma, para que Portugal detenha superioridade de informação e que consiga garantir a autoridade e segurança do estado neste espaço, através de uma vigilância e fiscalização permanente é necessário colmatar a lacuna da vigilância acústica ao implementar uma barreira acústica fixa e permanente, complementada por navios e *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV).

### **Objeto de estudo e sua delimitação**

O mar desempenha um papel significativo numa ampla perspetiva de segurança e defesa nacional devido à sua localização marítima estratégica e aos desafios de segurança que podem surgir das águas circundantes. Esta localização estratégica dá a Portugal o controlo de importantes rotas marítimas e permite o acesso ao Mar Mediterrâneo e ao Oceano Atlântico. Além disso, possibilita a Portugal a projeção do seu poder naval, controlar as atividades marítimas e salvaguardar as suas águas territoriais.

O mar oferece a Portugal um ponto de observação privilegiado para monitorizar e recolher informações sobre as atividades marítimas que se desenrolam na enorme extensão dos espaços marítimos sob responsabilidade nacional. Para salvaguardar, proteger e reclamar o seu território é necessário possuir uma forte capacidade de vigilância marítima que inclua o espaço submarino de modo a manter um Conhecimento Situacional Marítimo (CSM) atualizado. Por sua vez, permitirá um aviso antecipado de potenciais ameaças, como o tráfico ilegal, a pirataria ou incursões de navios não autorizados, permitindo uma resposta atempada e medidas de defesa eficazes. Para

garantir a soberania nos espaços marítimos nacionais, Portugal suporta-se na atividade operacional das fragatas e submarinos da Marinha e dos aviões de patrulha aérea marítima da Força Aérea Portuguesa (FAP).. Todavia, face à imensidão do espaço marítimo nacional e à diminuta atividade dos meios aeronavais não é possível possuir uma capacidade contínua e efetiva de vigilância do espaço submarino.

Portugal, além de ter uma grande extensão de costa tem também várias infraestruturas críticas, como portos e cabos submarinos de comunicações. No que diz respeito aos portos, incluem-se Lisboa, Leixões e Sines, que funcionam como centros vitais para o comércio marítimo e a logística. O porto de Lisboa, em especial, é onde está localizado a Base Naval de Lisboa e todos os centros de decisão das Forças Armadas (FFAA), edifícios do governo e demais centros de decisão da República, a sua maioria estacionária na cidade capital. Garantir a segurança destes portos é essencial tanto para a estabilidade económica como para a defesa nacional. Para Marreiros (2018), tal como um oponente pode utilizar pequenas embarcações ou submarinos para atuar em espaço nacional sem ser detetado, o ambiente submerso pode ser usado em ações de vigilância acústica, sem que esse oponente se aperceba que foi detetado e que está a ser monitorizado.

Com base descrito anteriormente, o objeto desta dissertação consiste numa prova de conceito de uma implementação de uma barreira acústica de baixo custo em águas pouco profundas que pode ser facilmente expandida e evoluída para diferentes cenários, para efetuar vigilância e controlo dos espaços marítimos nacionais, com o objetivo de detetar e classificar submarinos, bem como contactos de superfície.

O estudo da implementação de uma barreira acústica está circunscrito geograficamente aos espaços marítimos sob soberania e jurisdição nacional, neste trabalho abreviados como espaços marítimos nacionais. Fazem parte dos espaços marítimos sob soberania nacional as águas interiores, o mar territorial e a plataforma continental. A Zona Económica Exclusiva (ZEE), à luz da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), é considerado um espaço marítimo sob jurisdição nacional, onde se exercem os poderes do Estado no quadro da convenção (PCM,2002).

Para a prova de conceito, e devido a restrições financeiras e temporais de implementação de novos sistemas, serão utilizados neste trabalho os equipamentos já existentes no CINAV.

## **Objetivo**

O principal objetivo do presente trabalho de investigação é descrever uma implementação de uma barreira acústica que poderá ser implementada recorrendo aos recursos nacionais disponíveis e a equipamentos de baixo custo, que potencializem a capacidade de Portugal efetuar vigilância acústica nos espaços marítimos nacionais.

A questão principal da investigação que definiu o rumo da presente dissertação será a seguinte:

**Como implementar uma barreira acústica com os recursos disponíveis que potencialize a capacidade de Portugal efetuar vigilância acústica nos seus espaços marítimos?**

## **Metodologia de Investigação**

A definição da metodologia num trabalho de investigação é considerada como o método de definir os processos necessários para atingir um fim ou resultado desejado (Freixo,2011). A metodologia adotada para a presente dissertação encontra-se ilustrada na Figura 1.

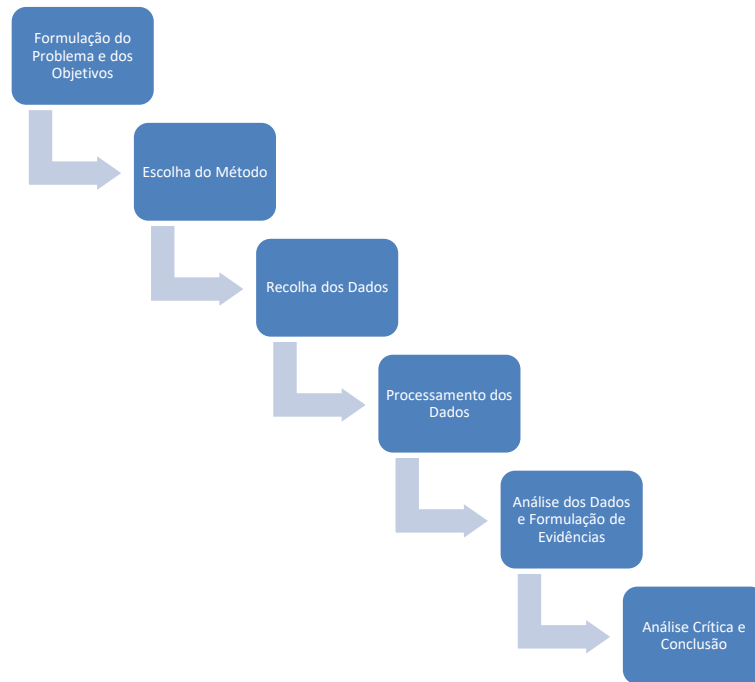


Figura 1- Metodologia adotada

Numa fase inicial, foi necessário efetuar uma pesquisa extensa que denotasse a relevância do tema e definir objetivos, metas e tarefas concretas que culminaram na descrição de uma implementação de barreira acústica. Para fazer face à questão e objetivo propostos, foram identificadas as seguintes tarefas:

- Aquisição e processamento de dados utilizando hidrofones;
- Aquisição e processamento de dados utilizando um sonar passivo rebocado experimental. Devido à sua natureza experimental, estas tarefas foram efetuadas recorrendo a engenharia reversa;
- Testar diversas configurações de barreiras acústicas com os equipamentos disponíveis;
- Efetuar testes experimentais extensivos, demonstrando num cenário perto do esperado o desempenho esperado do sistema desenvolvido;
- Efetuar o processamento de todos os dados recolhidos, por forma a retirar o máximo de informações dos mesmos.

O resultado das campanhas levadas a cabo nos exercícios *Robotics Exercise (REX)2022* e *Fibersense* são os dados recolhidos. Posto isso, torna-se necessário realizar um processamento de dados de forma a detetar a origem do som e posteriormente, classificá-lo. É fundamental fazer uma análise crítica e concluir como se pode implementar uma barreira acústica nos espaços marítimos nacionais, utilizando os recursos à disposição.

## **Estrutura**

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

- **(Capítulo 1) Vigilância Marítima** - No capítulo inicial, foi explorado os fundamentos concetuais e estratégicos, bem como a estrutura de um sistema de vigilância marítima;
- **(Capítulo 2) Enquadramento teórico** - Neste capítulo, examina-se a natureza física do som, em particular como este se comporta na água, abrangendo os processos e fenômenos relacionados à sua propagação, além de alguns fatores ambientais que exercem influência sobre o mesmo. É explorado também, o funcionamento dos sistemas baseado em sonar. Por fim, abordaremos as temáticas *de Machine Learning* e descrever os sistemas de apoio à decisão utilizados para classificação;
- **(Capítulo 3) Vigilância Acústica** - Neste capítulo, faremos uma abordagem sucinta dos sistemas implementados para realizar vigilância acústica e uma descrição pormenorizada dos equipamentos utilizados neste trabalho. Desde as suas características técnicas à configuração esquemática de emprego no meio aquático;
- **(Capítulo 4) Resultados Experimentais** - Nesta etapa, apresenta-se uma descrição pormenorizada das campanhas para a recolha dos dados e são descritos os procedimentos utilizados no processamento dos dados. Numa primeira instância meramente descritiva, demonstrando como

cada som gerado foi captado. Posteriormente, identificar a origem do som, calculando a direção de onde é proveniente o sinal acústico, ou *Direction of Arrival* (DOA). Para terminar a etapa do processamento de dados, será aplicado um sistema de apoio à decisão para classificar os diferentes sons e assim identificar quem está a gerar o som;

- **Conclusões e Trabalho Futuro** - No capítulo final, são tiradas relações acerca dos resultados obtidos, respondida à questão que acompanha a execução deste trabalho bem como apresentadas sugestões para trabalho de futuro.



## **Capítulo 1- Vigilância marítima**

Neste capítulo, elaboraram-se os fundamentos conceituais e estratégicos que sustentam a atividade operacional das Forças Armadas (FFAA) no exercício da vigilância marítima dos espaços marítimos nacionais, bem como os requisitos que um sistema de vigilância marítima deve possuir.

### **1.1 Enquadramento concetual**

Esta temática insere-se no âmbito das ciências militares navais, no núcleo das técnicas e tecnologias militares, adotadas no aprimoramento das abordagens e procedimentos para fortalecer as capacidades de vigilância e controlo de espaços marítimos.

A obtenção de conhecimento acerca dos espaços marítimos atravessa um processo cíclico designado Observar, Orientar, Decidir, Agir (OODA) (Marques & Correia,2012,p.191). O ciclo OODA é um modelo de tomada de decisão desenvolvido pelo estrategista militar e Coronel da Força Aérea dos Estados Unidos John Boyd. Ele é amplamente utilizado em diversas áreas, como militar, empresarial e no desporto de alta competição, para tomar decisões rápidas e eficazes em ambientes dinâmicos e incertos (Boyd,2010). Este ciclo, retrata a adoção do modelo de investigação científica cultivado por Karl Popper(2005) ao estudo das doutrinas militares. Para Popper (2005), os limites da investigação científica são claros. Para que uma pesquisa seja classificada como científica, ela deve atender a certos critérios, sendo um deles o princípio da refutabilidade. Segundo esse princípio, a ciência concentra-se apenas em temas que possam ser testados de forma a permitir a refutação ou negação do conhecimento apresentado. Por outras palavras, nenhuma hipótese, proposição ou teoria empírica pode ser considerada científica se não houver a possibilidade de realizar observações que permitam colocá-las em questão ou invalidá-las. Estes aspetos assentam nos pilares da “falibilidade”, “verdade provisória” e “refutabilidade”.

Outra premissa fundamental na pesquisa científica é o conceito de "aproximações sucessivas", que destaca o facto de que a verdade sobre um

determinado acontecimento ou facto nunca pode ser totalmente alcançada, estando sempre sujeita a um aprimoramento contínuo. Com base no princípio da incerteza, o cúmulo de conhecimento não passa de uma busca contínua pela verdade, a qual, por sua vez, é igualmente inatingível, apenas uma possibilidade conjectural. O conhecimento é provisório, falível e passível de ser corrigido(IUM,2019).

É nesta ótica concetual que se enquadra o conceito de CSM, que aspira a “criação de saber acerca do espaço de ação ou de envolvimento, que será o espaço marítimo de interesse (permanente ou conjuntural), com o objetivo de, entre outras finalidades, prever, identificar e localizar situações anómalas e assim propiciar tomada de decisões atempadas e mais informadas, que levem a que as ações subsequentes provoquem os efeitos desejados no tempo e na medida dos interesses de quem os toma” (Marques & Correia, 2012, p. 190).

A vigilância marítima faz parte do CSM, atuando nas fases de “observação” e “orientação”. Na etapa “observação”, são utilizados sistemas que recolhem dados acerca do ambiente marítimo, analisa-os e avalia a situação em que se encontra. Isso inclui perceber os eventos, identificar mudanças e entender as dinâmicas do contexto. Por outras palavras, permite detetar se existe algum contacto, identificá-lo e determinar se estamos perante um navio ou submarino indesejado. Na etapa seguinte, “orientação” são usados sistemas de informação para interpretar e processar os dados para criar um quadro da situação. Por sua vez, envolve compreender as implicações dos dados, identificar padrões e considerar fatores que influenciem o processo de análise e de tomada de decisão.

Após a etapa de “ação”, o ciclo OODA não termina. Ao contrário, ele prossegue como um processo contínuo de aprendizagem e adaptação. Retorna então à etapa de observar para avaliar os resultados, analisar o feedback e atualizar sua compreensão da situação, como demonstrado na Figura 2.

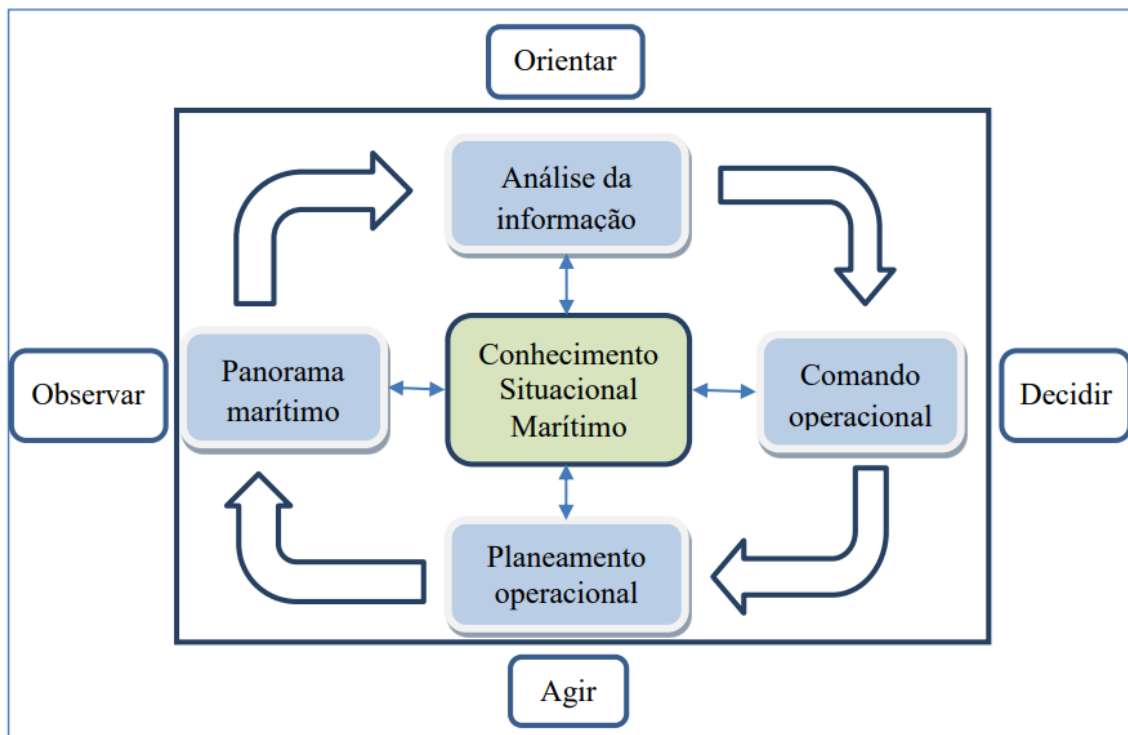


Figura 2- Enquadramento do CSM no ciclo OODA

Fonte: (Marreiros,2018,p.6)

## 1.2 Enquadramento estratégico

A vigilância dos espaços marítimos nacionais decorre da relação hierárquica de documentos estruturantes da defesa nacional, principiando na Lei de mais elevada hierarquia, a Constituição da República. Nesta Lei, segundo o n.º.1 do art.º273.º “É obrigação do Estado assegurar a defesa nacional” (AR, 2005, p.4682).

Decorrente da Constituição da República, a Lei Orgânica de Bases da Organização das Forças Armadas estipula (AR, 2009), que a atuação das Forças Armadas se desenvolve no respeito pela Constituição e pela lei, em execução da política de defesa nacional definida e do Conceito Estratégico de Defesa Nacional aprovado.

O mar, surge então como um ativo crucial para a coesão territorial e a valorização económica do país. A estratégia ministerial para o mar, tem como foco principal o crescimento da economia do mar salvaguardando a sua preservação, tendo a afirmação da soberania como um dos pilares estratégicos. Neste âmbito, torna-se imperativo

efetuar um controlo e fiscalização permanente, que passa, obrigatoriamente, por dispor de sistemas de vigilância marítima, dos quais se incluem as barreiras acústicas pois permitem detetar e classificar alvos e compreender se estamos perante navios ou submarinos indesejados.

### **1.3 Caracterização de um sistema de vigilância marítima**

Para que um sistema seja considerado de vigilância tem que cumprir com alguns requisitos especiais e de transcendente complexidade tecnológica, com capacidade para incorporar e processar informação geográfica, apresentando também um conjunto diversificado de informação relevante para o CSM. Além disso, deve permitir uma permanente monitorização do espaço marítimo e na orientação e coordenação dos meios operacionais(Marreiros,2018).

Para Nejat *et al* (1998), os requisitos funcionais de um sistema de vigilância são definidos pelos seguintes parâmetros:

- a. Cobertura espacial: Área total abrangida pelo sistema;
- b. Cobertura espacial por unidade de tempo: Área abrangida por unidade de tempo;
- c. Tempo de refrescamento: Unidade temporal entre oportunidades de deteção de novos contactos;
- d. Exatidão referente à determinação da posição do contacto;
- e. Atraso na visualização da informação;
- f. Raio de incerteza;
- g. Probabilidade de deteção de contactos;
- h. Probabilidade de falsos contactos;
- i. Discriminação de contactos;
- j. Classificação e identificação de contactos; Refere-se à habilidade que um sistema tem para diferenciar diferentes categorias de plataformas, como por exemplo navio vs aeronave, amigo vs inimigo. Identificação, por sua

vez refere-se à habilidade de determinar o nome ou número de amura de um navio, ou número de cauda da aeronave.;

- k. Capacidade de operação em cenário de conflito armado: Reflete a robustez do sistema;
- l. Capacidade de comunicação entre outros sistemas;
- m. Capacidade de *tasking*: Processo de direcionar o sensor para uma determinada área de interesse.

Todas estas características são essenciais no processo de aquisição de novos equipamentos. Todavia, visto que estamos a desenvolver um sistema de baixo custo é de destacar a característica (j.) que faz parte das tarefas deste trabalho, e que realmente é diferenciadora e capaz de detetar e classificar um alvo e assim compreendermos se estamos a lidar com algo indesejado.

## Capítulo 2- Enquadramento teórico

Neste capítulo, examina-se a natureza física do som, em particular como este se comporta na água, abrangendo os processos e fenômenos relacionados à sua propagação, além de alguns fatores ambientais que exercem influência sobre o mesmo. É explorado também, o funcionamento dos sistemas baseado em sonar. Por fim, abordaremos as temáticas *de Machine Learning* e descrever os sistemas de apoio à decisão utilizados para classificação.

### 2.1 Acústica

O som é uma manifestação de energia mecânica que ocorre através do movimento periódico das moléculas em um meio elástico. Este, resulta de uma perturbação local, que provoca vibração do seu meio, ou seja, modulação da pressão ambiente a partir de um ponto, para pontos circundantes (Urick,1983).

A existência de um meio físico de propagação é fundamental. Esta necessita de um suporte mecânico pelo que não se propaga no vácuo. Esta propagação de energia ocorrerá então em qualquer meio material seja ele, sólido, líquido e gasoso. A propagação do som resulta de uma modulação da pressão ambiente e dependerá sempre das condições do meio. Nos fluidos, área que diz respeito à acústica submarina, esta é longitudinal. As ondas longitudinais traduzem-se numa compressão e rarefação sucessiva do meio. Pelo contrário, nos sólidos o som propaga-se sob a forma de ondas transversais como também de ondas longitudinais. As ondas longitudinais nos sólidos designam-se de ondas de pressão(Apel,1987).

Com base no acima descrito, podemos constatar que na verdade som não é nada mais que uma variação de pressão ao longo do tempo. Assim sendo, o sinal acústico de mais simples representação corresponderá a uma função com a oscilação da pressão  $p$  em função do tempo  $t$ (Crocker, 1998):

$$p = A\sin(\omega t - \theta) \quad (1)$$

onde  $A$  corresponde à amplitude da onda,  $\omega$  a frequência angular e  $\theta$  a constante de fase.

Este som puramente sinusoidal servirá, mais adiante, para base de estudo da nossa recolha de dados (Figura 3).

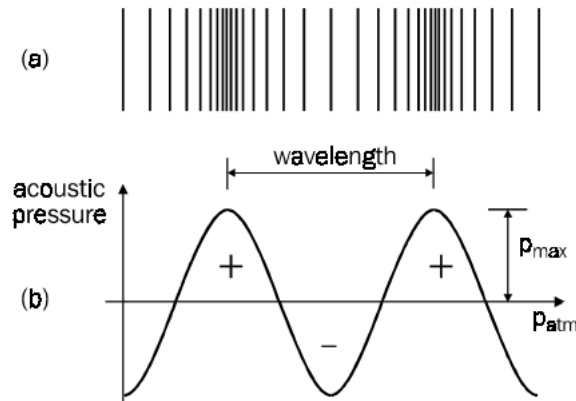


Figura 3- Modulação da pressão ambiente

Fonte: Hansen, 2001, p. 24.

### 2.1.1 Características do som

Nesta subsecção abordaremos as características do som que são comuns tanto para o meio submarino como também fora dele.

#### 2.1.1.1 Frequência, Período e Comprimento de Onda

Uma onda acústica resulta de uma perturbação local que se mantém por um determinado período do tempo. A frequência e o período dependem da fonte emissora, enquanto que o comprimento de onda depende do meio.

A frequência ( $f$ ) mede-se em Hertz (Hz) no Sistema Internacional (SI) e corresponde ao número de ciclos por segundo.

O período ( $T$ ) é inversamente proporcional à frequência e corresponde ao tempo entre repetições. Mede-se em segundos (s) e pode ser descrita por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

O comprimento de onda corresponde à distância entre pontos em fase e mede-se em metros (m). Depende da frequência ( $f$ ) e velocidade de propagação ( $C$ ).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

### 2.1.1.2 Intensidade acústica

A intensidade auditiva corresponde, no seu parâmetro físico, à amplitude da variação de pressão, como demonstrado na figura 4. Uma maior amplitude corresponderá a uma maior variação de pressão no meio. Com uma maior amplitude o ouvido humano tem uma percepção de som forte, e com uma amplitude mais baixa percepção de som fraco.

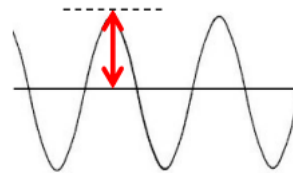


Figura 4 -Intensidade acústica

A expressão seguinte dá-nos a relação entre intensidade acústica e pressão acústica:

$$I = p^2 / \rho c \quad (4)$$

onde  $I$  corresponde à intensidade acústica ( $W/m^2$ ),  $p$  a pressão acústica (Pa ou  $N/m^2$ ),  $\rho$  a densidade do fluido ( $Kg/m^3$ ) e  $c$  a velocidade do som (m/s).

### 2.1.1.3 Noção de Decibel (dB)

Como pudemos observar anteriormente, na propagação das ondas acústicas existe uma variação considerável da sua pressão ou energia. Recorrendo a uma escala logarítmica, em detrimento de uma linear, é possível quantificar essas grandezas de maneira mais simples e são comumente utilizadas para representar intensidade acústica. Além disso, torna-se vantajoso utilizar uma escala logarítmica dada a capacidade auditiva do ser humano que é sensível para valores entre  $20\mu Pa$  e  $200\mu Pa$ .

A mais comum escala logarítmica é o decibel (dB). O decibel representa uma medida relativa ou rácio. Cada quantidade em decibel é expressada como um rácio relativo a uma referência de pressão acústica, potência ou intensidade (Crocker, 1998), que pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$\text{Decibel(dB)} = 10 \left( \log_{10} \left( \frac{p^1}{p^0} \right) \right) \quad (5)$$

Sempre que um valor logarítmico de uma relação entre intensidades acústicas é expresso em decibel e este tem a designação de nível (N).

$$N \text{ (db)} = 10 \left( \log \left( \frac{I^1}{I^0} \right) \right) \quad (6)$$

onde  $I_1$  corresponde a uma dada intensidade e  $I_0$  à intensidade de referência. Os níveis de intensidade acústica referem-se ao valor da intensidade de referência. A unidade de referência do decibel para o ar é de  $20\mu\text{Pa}$  e para a água de  $1\mu\text{Pa}$ .

## 2.2 Acústica submarina

Nesta secção abordaremos os parâmetros físicos do som na água, desde os condicionantes à sua velocidade, teorias da propagação as fontes de ruído presentes no oceano e por fim analisaremos as medidas de avaliação de desempenho dos sistemas baseado em SONAR.

### 2.2.1 Velocidade de propagação do som na água

As ondas acústicas são intrinsecamente rápidas oscilações na densidade de um meio elástico provocadas por alterações de pressão (Apel, 1987, p.349). Desta forma, a velocidade de propagação do som na água (C) corresponde à taxa de propagação dessas oscilações e é expressa em (m/s). Como podemos constatar, a sua velocidade depende das condições de propagação do meio. Sendo que a velocidade do som depende da

densidade e do módulo de elasticidade do meio, uma das equações para calcular a sua velocidade será:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

onde  $\rho$  corresponde à densidade do meio e  $E$  o módulo de elasticidade.

Existem diversas equações para calcular a velocidade do som na água, que derivam da equação do estado para a água do mar. Todavia, a abordagem preferida está relacionada com a medição direta da velocidade do som no meio. Esta equação é dada em termos de salinidade, temperatura e profundidade, que como veremos são os fatores que condicionam a Velocidade de Propagação do Som na Água (VPSA).

Uma das maneiras de medir diretamente a velocidade do som na água, é através de equipamentos específicos designados *Conductivity, Temperature, Depth* (CTD) e *Sound Velocity Profiler* (SVP).

Um CTD mede três parâmetros. A condutividade, temperatura e pressão. Estes parâmetros são considerados fundamentais pois formam a base da caracterização da água do mar. A medição destes permite o cálculo de algumas características como a densidade e salinidade. Outra propriedade que pode ser obtida através dos parâmetros CTD é a velocidade do som (AML Oceanographic, 2018).

Por sua vez, um SVP mede a VPSA através de conceitos físicos e princípios fundamentais. Para realizar esta medição, o sensor envia um sinal acústico que viaja

uma distância fixa conhecida. Desta forma, o som depois é calculado de maneira muito simples através de uma relação entre a distância e tempo percorrido (Figura 5).



Figura 5- Sensor SVP.

Fonte: AML Oceanographic, 2018.

Em termos de comparação, o SVP em detrimento do CTD está a medir o parâmetro tempo. O sensor depende exclusivamente de princípios físicos e não de observações. Podemos também constatar que o SVP funciona em qualquer tipo de fluido. Uma vez que o CTD tem quatro (4) fontes distintas de erro (mesmo que sejam marginais), vão contribuir para uma maior imprecisão em relação ao SVP. Em média, tem uma precisão na ordem dos  $\pm 0.25$  m/s. O SVP depende então de calibrações extremamente precisas, em ambientes onde se sabe exatamente a VPSA e são capazes de alcançar precisões na ordem dos  $\pm 0.025$  m/s. Por exemplo, um tanque com água destilada a uma temperatura constante (Bilaniuk, 1993).

Outro fator preponderante na escolha de um em detrimento de outro, está diretamente relacionado com o local de instalação. Um navio em missão *Anti Submarine Warfare* (ASW) equipado com *Sound Ranging and Navigation* (SONAR) necessita de saber a todo o instante a velocidade com que está a enviar o seu sinal acústico ou recebê-lo. Os sensores CTD são normalmente fabricados em materiais como vidro ou cerâmica enquanto que os SVP, muito mais robustos, de carbono ou titânio. Logo, um

sensor SVP será mais indicado para instalação em cascos de navios ou ainda em locais que têm uma grande variação da temperatura, fator que mais condiciona a VPSA (Chen, 1977).

O ideal é ter no mesmo equipamento ambos sensores. Para medir a VPSA o SVP e para quando for necessário calcular coeficientes de absorção, comparar com dados antigos ou obter algum daqueles parâmetros individualmente. A maioria dos equipamentos vem com ambos os sensores (Figura 6).



Figura 6- Equipamento utilizado no trabalho com capacidade CTD e SVP.

Para compreendermos o comportamento do som no meio aquático, torna-se necessário analisar individualmente os fatores que influenciam a sua velocidade, que como já vimos são a temperatura, salinidade e pressão. O aumento destes, por sua vez, aumentam a velocidade do som. Todavia, nem todos têm o mesmo peso como veremos adiante. O fator temperatura, regra geral, é aquele que tem mais ponderação no seu aumento.

### **Temperatura:**

Este é o fator mais importante na VPSA. Regra geral, à medida que a profundidade aumenta a temperatura baixa, logo corresponderá a uma

diminuição da velocidade do som. Todavia, a influência da temperatura faz-se sentir até sensivelmente os 1000m de profundidade, apresentado a partir daí uma isotérmica, demonstrado na Figura 7 (Apel, 1987, p.349).

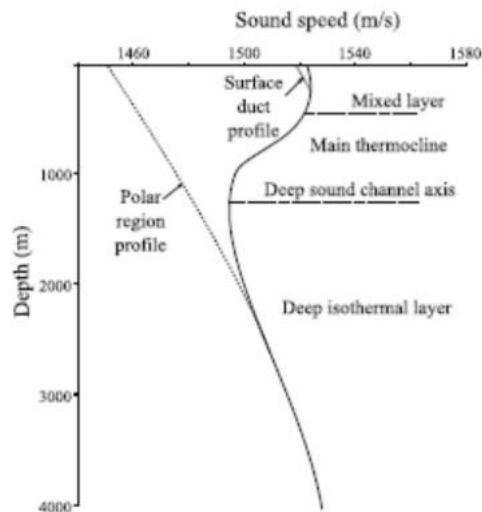


Figura 7- Perfil genérico da VPSA.

Fonte: Apel, 1987.

Como podemos constatar no perfil representado na Figura 7, a variação da VPSA nas camadas superficiais é máxima. Isto deve-se ao aquecimento solar diurno, às correntes marítimas e à mistura de superfície. Podemos também aferir a partir do gráfico que até à profundidade limite, a temperatura é o fator que mais influencia, dando depois lugar ao efeito da pressão, regra geral (Apel, p.350).

A insolação (aquecimento solar), as trocas de calor com águas mais profundas e advecção horizontal devido a correntes são os fatores que afetam a distribuição da VPSA.

A insolação tem largas dificuldades em aquecer massas de água mais profundas e origina o efeito da tarde, designado de *transient thermocline* (Apel, 1987).

Nas trocas de calor com águas mais profundas, observamos os processos de upwelling e convecção (Figura 8), onde irá ocorrer mistura física entre a camada de superfície em profundidade (Apel, 1987, p.256).

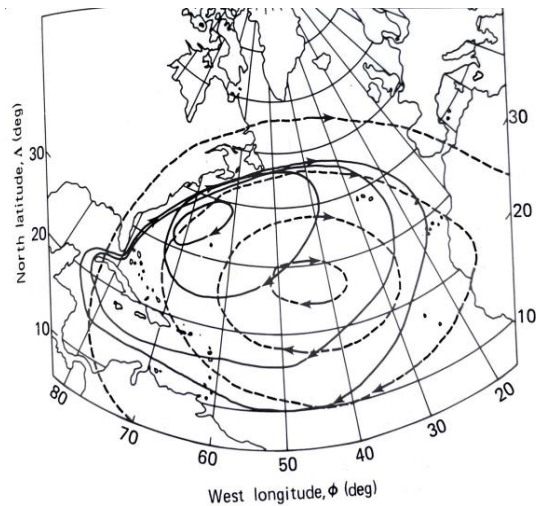


Figura 8- Esquema das linhas de corrente à superfície da tensão do vento (linhas tracejadas) e da corrente (linhas sólidas) para uma bacia oceânica simétrica com uma taxa de rotação constante

Fonte: Apel, 1987, p.297

A partir do perfil genérico da VPSA podemos estruturar a distribuição da temperatura por camadas. Na camada de superfície (*Mixed layer*) ocorrem variações sazonais, bastante afetada pelas condições meteorológicas. É também uma camada com profundidade variável (MLD-Mixed layer depth).

Logo abaixo da camada de superfície, encontra-se a termoclina. Esta camada é caracterizada por ter um gradiente negativo da temperatura em profundidade. Existem dois tipos de termoclinas. A termoclina sazonal, depende do aquecimento da camada de superfície e da ação do vento. Durante o inverno, os dias apresentam-se com menor insolação e uma ação conjunta com ventos fortes que resultam num maior arrefecimento da superfície. Quando estamos perante estas condições, a termoclina poderá resultar numa isotérmica (temperatura constante). Pelo contrário, durante o verão a insolação é elevada e o vento fraco, o que corresponderá a uma grande variação da temperatura em pouca profundidade. A termoclina permanente, por sua vez,

dependerá exclusivamente de variações regionais de temperatura, apresentado um gradiente negativo da temperatura em profundidade. Entre estas duas, pode aparecer uma isotérmica e daí surgir um gradiente positivo da velocidade do som. Ao surgir um gradiente positivo da velocidade do som, irá se formar um canal de som(Urick,1983).

Por último, na camada profunda a variação da temperatura é muito próxima de nula e o efeito da pressão será imperante na VPSA.

Um navio empenhado em operações ASW deparar-se-á com um efeito derivado à temperatura que dificultará imenso a deteção de um submarino. Este, é conhecido como o Efeito da Tarde e resulta do aquecimento da camada superficial durante o dia e arrefecimento no arco noturno, originando termoclinas de transiente (Crocker, 1998).

Deste efeito, resultam algumas implicações. Como veremos mais adiante, o som é preguiçoso e ao encontrar um meio com menor velocidade este irá sofrer uma refração para o mesmo. Logo, o transdutor quando emite um sinal acústico este irá encurvar em direção ao meio com menor velocidade. Este efeito, resulta numa degradação dos alcances dos sonares na camada de mistura e está associado ao efeito de *Skip Distance*, que irá formar uma zona de sombra (Figura 9). Este, é bastante conhecido no meio dos submarinos e os mesmos usam-no a seu favor para evitar serem detetados (Marage, 2013).

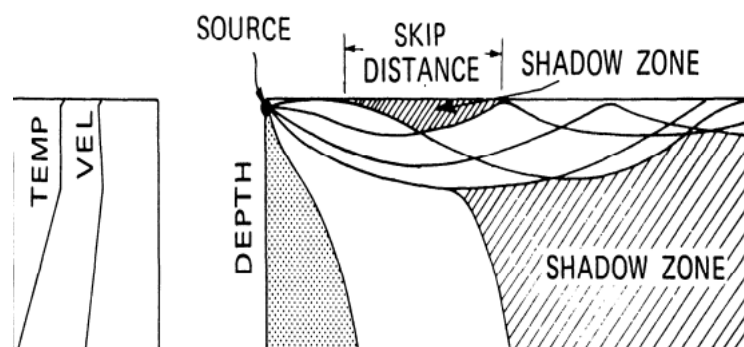


Figura 9- Impacto do efeito da tarde

### Salinidade:

A água do mar é constituída na sua maioridade por iões de sódio, potássio e cálcio, entre outros. Este resulta numa constituição média da salinidade dos oceanos, de 30 a 35 partes por milhão (ppm) (Lurton, 2002). A variação da salinidade não tem correlação com a profundidade e depende, regra geral, de misturas com cursos de água doce (Figura 11).

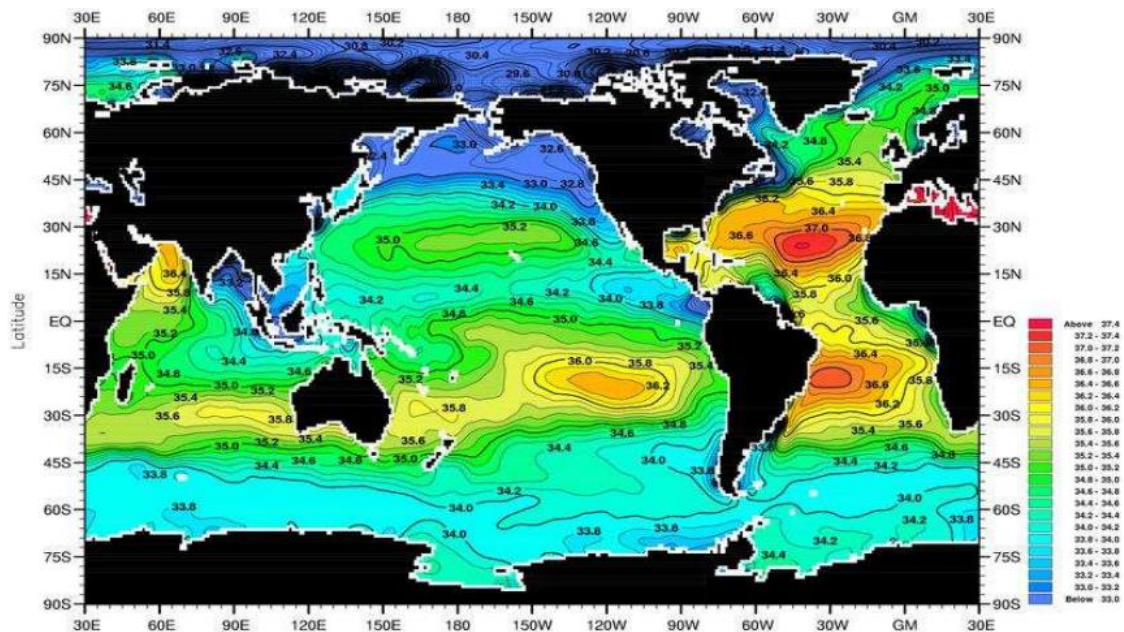


Figura 11- Distribuição anual da média da salinidade à superfície.

Fonte: NOAA, 2001.

### Pressão:

O impacto da pressão como já podemos observar dos gráficos do perfil da VPSA, só tem uma maior influência a partir da camada profunda, ou seja, quando o fator temperatura e salinidade são constantes. A variação da velocidade com a pressão é bastante linear e um aumento de 10 metros de profundidade provoca um acréscimo de 0,17 m/s na VPSA(Lurton,2002).

Com base no descrito anteriormente, concluímos que os fatores analisados terão impacto direto no módulo de elasticidade e densidade, parâmetros que utilizamos para

definir a primeira equação para a velocidade do som. Com base em observações empíricas em laboratório utilizando água destilada, Wilson (1960) definiu uma equação para calcular a VPSA, que resultou num desvio médio de 0.30m/s:

$$C = 1449 + 4,6T - 0.055T^2 + 1,39(S - 35) + 0.017D \quad (8)$$

onde  $C$  corresponde à velocidade do som na água (m/s),  $T$  a temperatura °C,  $S$  a salinidade em partes por milhão (ppm) e  $D$  a profundidade (m).

### 2.2.2 Propagação dos raios sonoros

A teoria dos raios acústicos e a técnica de *Ray Tracing* fornece uma abordagem simples e útil na determinação da direção da propagação de sinais acústicos. Estas, derivam de aproximações de alta frequência da equação de ondas. Embora estes modelos sejam convencionalmente aplicados para frequências de sonar ativo, têm-se provado bastante precisos também para aplicações de baixas frequências (<1kHz) (Hovem,2011). A propagação das ondas acústicas, pode ser expressa matematicamente pela Equação (9) que, relaciona a pressão  $p$  com  $u(x, y, z)$  e tempo  $t$ :

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial u^2} \quad (9)$$

A teoria dos raios acústicos fundamenta-se nos conceitos de que, ao longo das frentes de onda, a fase da onda ou a representação temporal da solução permanece constante (Figura 12), enquanto o movimento do som gerado por uma fonte no meio é explicado através de raios, de forma similar ao que ocorre com a radiação eletromagnética dentro dessa mesma abordagem de raios (Apel, 1987, p.359).

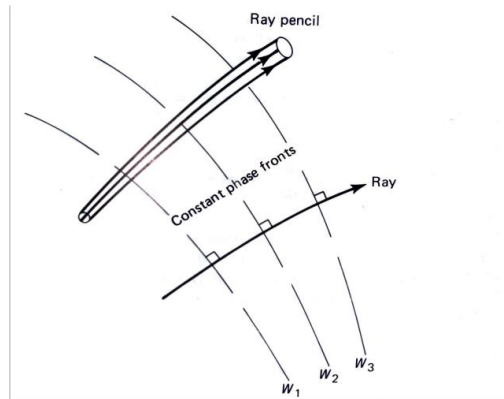


Figura 12-Frentes de fase e raios acústicos num meio com pouca variação da VPSA

Fonte: Apel, 1987, p.361

Um dos desdobramentos da teoria dos raios é a utilização da lei de Snell-Descartes, a qual explica a forma como os raios sonoros sofrem refração ao atravessar um meio que apresenta mudanças na sua velocidade (Figura 13). De acordo com essa lei, “um raio  $\Phi_i$  a incidir, com um ângulo  $\theta_1$ , na fronteira entre duas camadas com velocidades distintas, produzirá um raio  $\Phi_r$  resultante da reflexão e um raio  $\Phi_t$  refratado com um ângulo  $\theta_2$ ” (Rousseau,2020).

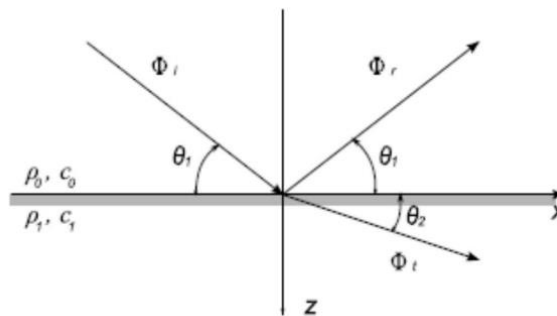


Figura 13- Representação da Lei de Snell-Descartes

Fonte: Andersson, 2008, p.4

Ao dividir a coluna de água num número finito de camadas com densidade semelhante e com diferentes velocidades do som, a lei de Snell pode ser utilizada para

calcular a trajetória da onda através da água. Este método é vulgarmente conhecido como *Ray Tracing* (Andersson,2008,p.5) e está demonstrado na Figura 14.

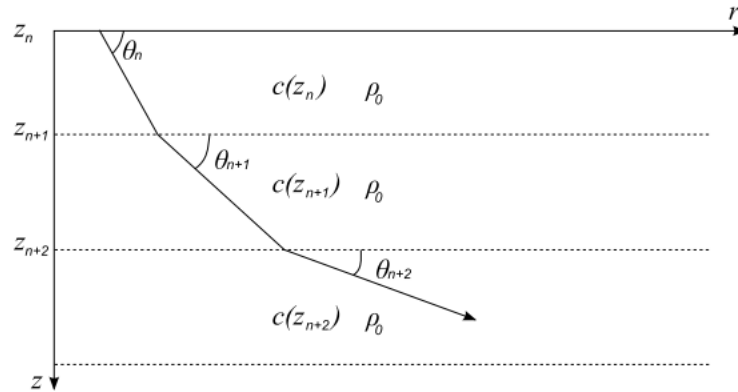


Figura 14-Lei de Snell-Descartes aplicada à teoria da propagação dos raios acústicos

Fonte: Andersson, 2008, p.5.

Com base descrito previamente, podemos concluir que num meio cuja velocidade do som varie linearmente com a profundidade, os raios sonoros são arcos de circunferência, ou seja, têm um raio de curvatura constante. Pelo contrário, se for um meio com velocidade do som constante, como podemos observar através das várias camadas distintas, este seguirá uma trajetória constante. Assim sendo, as velocidades e ângulos de incidência podem ser relacionadas através da seguinte equação da lei de Snell-Descartes (Andersson, 2008):

$$\frac{c_1}{\cos\theta_1} = \frac{c_2}{\cos\theta_2} \quad (10)$$

onde  $\theta_1$  é o ângulo incidente,  $\theta_2$  é o ângulo de refração,  $c_1$  a velocidade do som no primeiro meio e  $c_2$  a velocidade do som no seguinte meio após refração.

Se assumirmos que o gradiente da velocidade do som é linear, podemos calcular o raio acústico da seguinte forma (Figura 15):

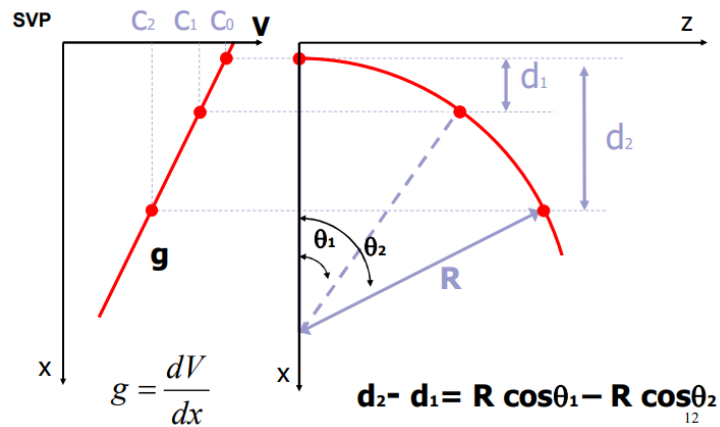


Figura 15-Esquema da propagação do raio sonoro

Uma vez que assumimos que o gradiente da velocidade é linear, temos:

$$c_1 = C_0 + gd_1 \quad (11)$$

$$c_2 = C_0 + gd_2 \quad (12)$$

obtendo assim:

$$d_2 - d_1 = (c_2 - c_1)/g \quad (13)$$

A circunferência terá um raio de:

$$R = -c_0/(g \cos \theta_0) \quad (14)$$

$$R = -c_{fonte}/g \quad (15)$$

O gradiente (g) como assumimos que a velocidade tem uma variação linear pode ser calculado pelo método de uma regressão de mínimos quadrados.

Podemos então inferir, através destas equações, que os raios são desviados em direção ao meio no qual a velocidade do som é mais baixa. Após percorrer uma distância específica, o raio sonoro alcançará o seu ângulo de incidência crítica, para o qual para

valores abaixo do mesmo, irá haver uma reflexão perfeita do raio sonoro (Andersson,2008,p.5).

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (16)$$

O ângulo crítico só existirá se a velocidade do segundo meio for superior, caso contrário o raio irá continuar com a sua trajetória.

Em uma situação em que existe uma camada de água isotérmica, na qual a velocidade do som permanece constante, não ocorrerão mudanças significativas nos ângulos de propagação do som. Isso possibilita um alcance considerável dos raios sonoros. O som irá propagar-se em linha reta em todas as direções e não há refração do som. Este irá refletir entre o fundo e a superfície e vem demonstrado na Figura 16 (Marage,2013,p.28).

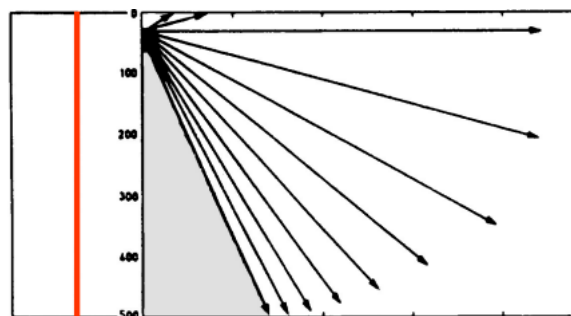


Figura 16- Propagação num meio isotérmico

Porém, se o gradiente de temperatura for negativo (Figura 17), resultando em uma diminuição da velocidade com a profundidade, os raios sonoros serão desviados para baixo. Isso pode originar uma região de sombra na qual uma onda sonora não será capaz de se propagar(Marage,2013).

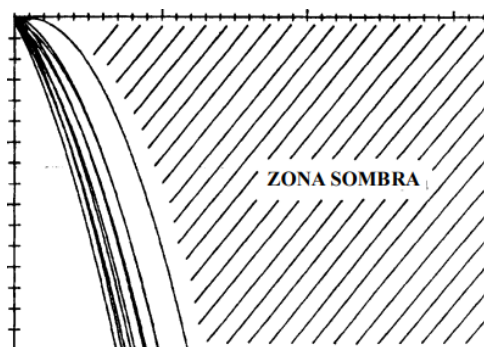


Figura 17-Propagação com gradiente negativo

Se ocorrer um gradiente positivo o oposto acontecerá (Figura 18). Os raios serão refratados em direção à superfície, onde existe menor velocidade do som.

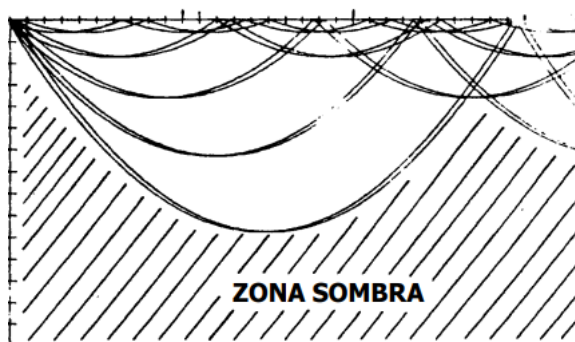


Figura 18- Propagação com gradiente positivo

Quando um gradiente de velocidade negativo se sobrepõe a um gradiente positivo, forma-se um canal sonoro. Nesse cenário, o som propaga-se ao longo de grandes distâncias nessa região até atingir o ângulo crítico. O mesmo poderá ocorrer com um gradiente positivo e a reflexão de raios sonoros na superfície, afetada pelas condições meteorológicas e oceanográficas.

O fenômeno do canal de som também pode ser observado em profundidade formando o canal SOFAR (Sound Fixing and Ranging), onde a velocidade do som é mínima e propaga-se por vastas distâncias.

### **2.2.3 Fontes de Ruído**

Nenhum trabalho relacionado com acústica submarina pode deixar de referir as fontes de ruído ambiente. Este é definido como todo o som gerado por fontes que não sejam aquelas que se quer captar que, por sua vez, interferem com o funcionamento de sistemas sonar ou outros aparelhos, em ambiente submerso (Apel, 1987, p.400).

Muitas fontes de ruído são ambientais. Constituem fontes ambientais, o vento, a ondulação e vaga, a chuva, atividade sísmica e correntes marítimas que contribuem para a cacofonia do som. Muitas espécies de cetáceos e peixes emitem também elevados níveis de ruído que se propagam por distâncias consideráveis (Marage, 2013, p.40).

Do ruído produzido por fontes antropogénicas, é de destacar o ruído produzido por navios de superfície e submarinos. Na verdade, são estes que pretendemos detetar, identificar e ainda classificar. É fundamental conseguir distinguir um som produzido por um navio ou submarino de um som produzido por outra fonte de ruído. Ao classificar uma fonte sonora eficazmente sabemos se estamos perante um navio ou submarino indesejado, contribuindo assim para a construção do CSM e permitir que sejam tomadas decisões atempadas. Numa fase mais adiante da investigação, discutiremos os métodos utilizados para classificar as fontes sonoras. Para classificar uma fonte sonora eficazmente, primeiramente é preciso conhecer o som gerado por estes para então reunir uma base de dados para o qual iremos construir o nosso sistema de apoio à decisão. Iremos agora analisar o ruído radiado pelos navios e suas características (Figura 19).

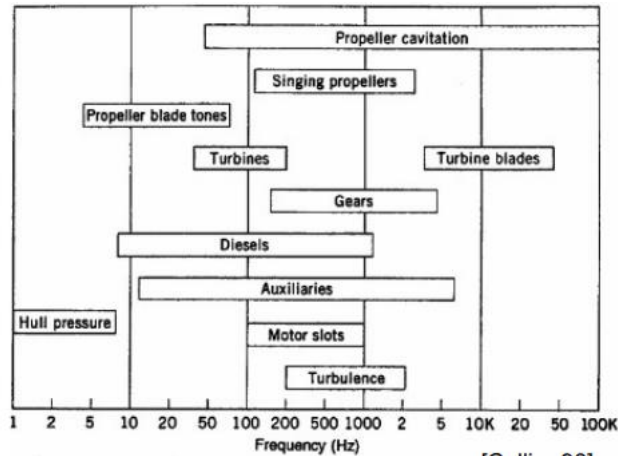


Figura 19- Espectro de frequências produzidos por navios

Fonte: Collier, 1998.

O som gerado por navios podem ser agrupados em três grandes classes (Marage, 2013, p.65):

- Som gerado por máquinas;
- Som gerado pela hélice;
- Som gerado por efeitos hidrodinâmicos.

### **Ruído gerado por máquinas**

Tal como as leis da termodinâmica que estabelecem que o calor é um subproduto inevitável de uma força mecânica, o som também o pode ser considerado da mesma maneira. Os motores elétricos, as turbinas, os motores diesel e as engrenagens produzem vibrações mecânicas devido a fenômenos específicos, como o equilíbrio imperfeito, o atrito e ressonância de estruturas, entre outras (Marage, 2013, p.65).

Os sons gerados por vibrações mecânicas que resultam de equilíbrios imperfeitos, as engrenagens através da moagem das rodas dentadas e as explosões que ocorrem nos pistões geram um espectro contínuo com um nível espectral muito baixo de ruído tonal sob o qual se encontra a frequência fundamental do processo que conduz à vibração, bem como os harmônicos. Por sua vez, os sons gerados por fenômenos de cavitação e turbulência na circulação de líquidos nas bombas e válvulas e também de

fricção mecânicas dos rolamentos geram ruído de banda larga e são distribuídos na frequência e não periódicos. Podemos então concluir que, a banda resultante do ruído de maquinaria é constituída por um espectro contínuo de ruído de baixo nível e baixa frequência sobre o qual se sobrepõem linhas de alto nível, como demonstrado na Figura 20.

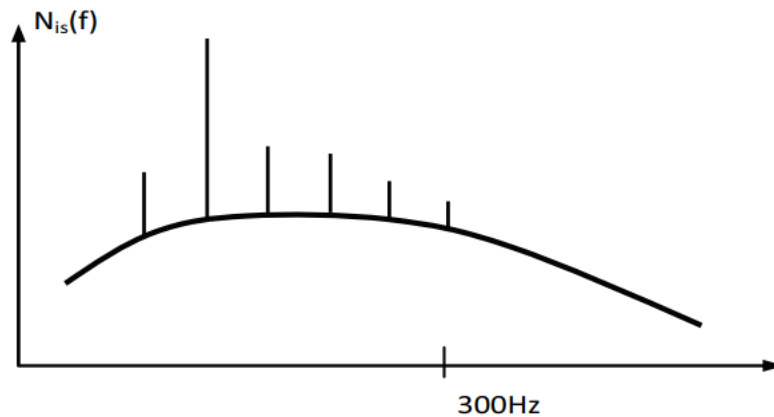


Figura 20-Forma típica de ruído de maquinaria

Fonte: Marage, 2013, p.66.

### **Ruído gerado por hélices**

Embora a hélice seja um componente essencial do motor do navio, o ruído que gera tem uma origem diferente e apresenta um espectro distinto em comparação com o que discutimos anteriormente. Ao contrário das máquinas cujas vibrações são transmitidas através do casco do barco, a hélice interage diretamente com o meio subaquático. O movimento da hélice resulta num ruído de propulsão combinado, o que implica um ruído caracterizado por uma combinação de um espectro de linhas discretas e um espectro contínuo(Marage, 2013, p.67).

Num navio, é a hélice que está sujeita à cavitação, uma vez que provoca grandes diferenças significativas de pressão (Figura 21). Em termos simples, o que a cavitação provoca é a formação de pequenas bolhas que quando sujeitas a tensão suficiente

sofrem uma queda na pressão interna até que a pressão de vaporização cresça. Esta pressão de vaporização vai atingir um máximo até que a bolha rapidamente colapse e produza vibrações (Marage, 2013, p.67).

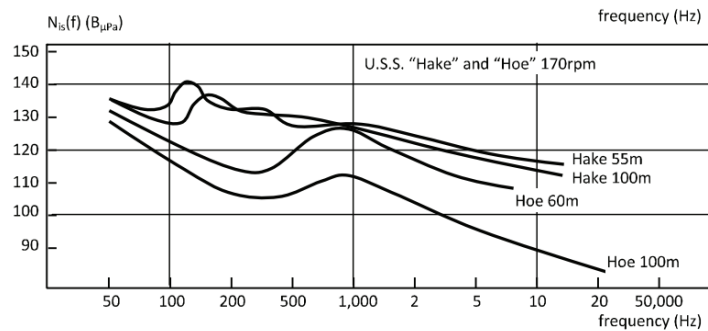


Figura 21-Típico ruído gerado por cavitação dos submarinos "Hake" e "Hoe"

Fonte: Marage,2013.

Além do ruído causado pela cavitação, outro fenômeno que ocorre está relacionado com as vibrações das pás e é caracterizado pela frequência das pás (*blade rate*). Este fenômeno é conhecido como *blade flutters* (Marage,2013.p.69). Este termo, relaciona-se com o número de pás de uma hélice e com a frequência de rotação do veio, segundo a seguinte expressão:

$$BR = N.SR \quad (17)$$

em que BR corresponde à frequência de rotações das pás, SR à frequência de rotação do veio e N o número de pás.

A frequência de rotação de um motor e do seu veio geralmente vem apresentado em rotações por minuto (rpm). No sistema internacional, a frequência é em Hertz (Hz). Basta dividir as rpm por 60 para obtermos a frequência em Hz. O espectro de frequências mais comum pode ser observado na Figura 22.

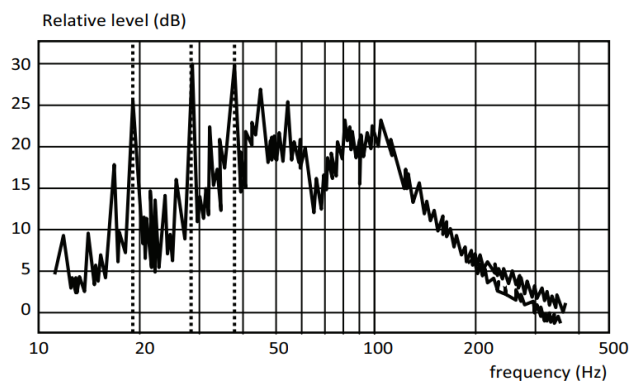


Figura 22- Espectro comum de *blade flutters*

Fonte: Marage, 1987, p.70

Por último, um dos fenômenos derivados da hélice é o conhecido *Propeller Whine* (Figura 23). As hélices dos navios, por vezes, emitem sons muito fortes entre 100Hz e 1.000 Hz. O som é por vezes tão intenso e as vibrações das pás tão fortes que é possível danificar a hélice. Frequentemente, só uma das pás é que causa esta vibração. A mesma é causada pela excitação de um dos modos de vibração da lâmina por atrito com a água.

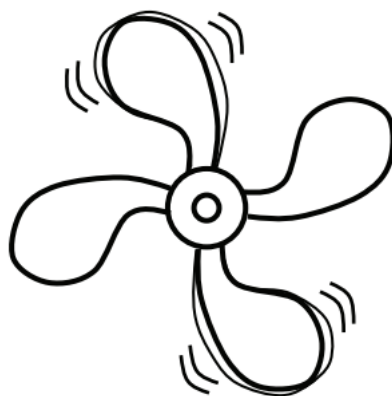


Figura 23-*Propeller whine*

Fonte: Marage, 1987, p.70.

### **Ruído gerado por efeitos hidrodinâmicos**

Este efeito é particularmente interessante na medida que raramente contribui de forma significativa para o ruído radiado porque é mascarado por outras fontes de

ruído. As flutuações de pressão devidas a um fluxo irregular de fluido (água do mar ao longo do casco de um navio) são a principal fonte de ruído hidrodinâmico.

Contudo, a passagem de um navio numa dada região do mar provoca uma pressão mecânica que um cabo de fibra ótica é bem capaz de atuar. A tecnologia *Distributed Acoustic Sensing* (DAS) explora o *backscattering* de *Rayleigh* induzida por laser no núcleo do *Fiber Optics Cable* (FOC) para a deteção acústica ao longo da fibra. Esta tecnologia será aprofundada mais adiante.

Para concluir, das três classes de ruído que abordamos é de destacar o ruído gerado pela maquinaria e hélices. Contudo, a contribuição relativa de cada efeito depende da frequência, velocidade do navio e profundidade de imersão de cada navio. É fundamental reconhecer que dois navios da mesma classe a navegar até com o mesmo regime de máquinas terão sempre assinaturas acústicas diferentes. Seja porque no seu fabrico foram sujeitos a pressões distintas, não terem o mesmo aperto nos parafusos, não terem exatamente o mesmo ângulo das pás, o deslocamento ser diferente pois levam cargas distintas e estão a produzir um efeito hidrodinâmico por consequente ou até mesmo os ruídos transientes gerados pela atividade da guarnição.

#### **2.2.4 Equação SONAR**

O desafio essencial em qualquer sistema de deteção ou estimativa reside em identificar um método para distinguir a contribuição de um sinal relevante da contribuição de sinais que se presume causarem interferência com o sinal que foi recebido. Para que um sistema SONAR possa ter sucesso, o nível do sinal que se quer captar tem que ser superior ao ruído. (Marage,2013,p.79).

Em um sistema de transmissão acústica, a energia captada é gerada diretamente pelo alvo no caso do sonar passivo, ou gerada pelo emissor e refletida pelo alvo no contexto do sonar ativo.

O desempenho dos sistemas de sonar, é frequentemente avaliado pelas equações de sonar passivo e ativo. As equações são formuladas considerando as perdas na propagação e levando em consideração as probabilidades específicas de deteção de

alvos ou ocorrência de falsos alarmes. Os principais parâmetros da equação do sonar, medidos em decibéis (dB), são os seguintes:

- *SL- Source Level*
- *TL- Transmission Lost*
- *TS- Target Strength*
- *NL- Noise Level*
- *AG- Array gain*

A equação sonar deve ter em conta o nível da fonte sonora (SL), a propagação e atenuação do som à medida que a onda acústica viaja do sonar para o alvo (TL), a quantidade de som refletida de volta para o sonar pelo alvo (TS), o ruído de ambiente no recetor (NL) e as características do recetor (AG).

#### **Equação SONAR ATIVA**

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL - AG) \quad (18)$$

#### **Equação SONAR PASSIVA**

$$SNR = SL - TL - (NL - AG) \quad (19)$$

O conceito de *SNR(Signal-to-noise ratio)* é crucial no contexto de sistemas Sonar, pois denota o limite até o qual a amplificação do sinal pode ser aplicada para aprimorá-lo. Quando esse limite é muito baixo, indica que o ruído está quase no mesmo nível do sinal. Nessa situação, aumentar a amplificação do sinal também aumentará o ruído, resultando em melhorias insignificantes. No entanto, em contrapartida, quando um *SNR* é elevado, a amplificação do sinal pode ser aplicada de forma mais eficaz, resultando em melhorias substanciais(Stergiopoulos,2017).

## 2.3 Processamento de Sinal

O notável progresso na criação de microchips e a sua utilização na elaboração de sistemas digitais eficazes nas últimas cinco décadas deu origem a um novo domínio conhecido como processamento digital de sinais, ou DSP.

Todos os sons são sinais, transformados por sistemas. Os sinais, por sua vez, podem ser classificados em duas categorias (Figura 24):

- Sinais contínuos;
- Sinais discretos.

Os sinais contínuos são definidos em cada instante de tempo, do início ao fim. Estes sinais ocorrem frequentemente na natureza, como por exemplo uma onda eletromagnética irradiada pelo sol ou uma onda acústica proveniente de um golfinho. Estes sinais são representados por funções contínuas, são difíceis de manipular e é aconselhado substituí-lo por amostras digitais, feitas com uma regularidade suficiente alta, ou seja, representá-lo por sinais discretos. Os sinais discretos são definidos em instantes de tempo discretos, talvez a cada milissegundo, segundo ou dia. Exemplos de tais sinais incluem o preço final de uma mercadoria específica numa bolsa de valores e a precipitação diária, ambos expressos como funções do tempo. (Antoniou,2006).

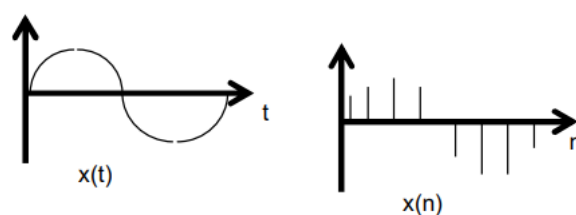


Figura 24- Representação de um sinal contínuo seguido de um discreto.

O processamento de digital, e em particular a representação de um sinal contínuo num discreto, traz inúmeras vantagens ao utilizador. Existe uma muito maior facilidade de implementação de sistemas discretos e acessibilidade em mudar as suas características que resulta numa maior robustez e fiabilidade do sinal, aplicar filtros “ideais” e uma potência de cálculo computacional maior.

### 2.3.1 Teorema da Amostragem

A amostragem de um sinal é o processo pelo qual os sinais em tempo discreto são frequentemente gerados a partir de sinais correspondentes em tempo contínuo.

Ao tempo que decorre entre cada instante de amostragem dá-se o nome de Período de Amostragem. O seu inverso, por sua vez, é designado de Frequência de Amostragem e corresponde à taxa uniforme a que os valores discretos são obtidos.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (20)$$

O Teorema de Amostragem de Nyquist-Shannon estabelece que é possível reconstruir um sinal específico somente se a frequência de amostragem for superior ao dobro da frequência máxima presente no sinal em questão. Portanto, podemos definir a Frequência de Nyquist como:

$$f_{Ny} = \frac{1}{2} f_s \quad (21)$$

Com base na expressão acima, podemos concluir que a frequência de Nyquist é a frequência máxima que um sinal pode ter para que possa ser amostrado por uma frequência de amostragem específica, para que o sinal seja reconstruído (Antoniou,2006).

Quando um sinal contínuo é amostrado com uma frequência  $f \leq f_{Ny}$  o sinal será preservado. Caso isso não aconteça e um sinal contínuo tenha uma frequência superior à da frequência de Nyquist, ocorrerá um processo designado de *Aliasing*. Significa que, há o risco do espectro interferir entre si próprio e o espectro ser diferente do original.

Ao aumentar a frequência de amostragem, iremos também aumentar a largura de banda que podemos usar sem interferir com o espectro.

### 2.3.2 Transformada de Fourier

Um qualquer sinal é passível de ser decomposto numa soma de exponenciais complexas. Uma exponencial complexa é simplesmente, uma soma de senos e cosenos.

Esta decomposição é especialmente útil, na medida que, a forma de onda da saída é semelhante à de entrada, sendo diferente unicamente na fase e amplitude. Estas funções são próprias de SLITS. Um Sistema Linear e Invariante no Tempo, é linear e a sua reação não é dependente do tempo em que foi gerado.

$$e^{iwn} = \cos(wn) + isin(wn) \quad (22)$$

Uma análise Fourier converte o sinal do seu domínio original, frequentemente em tempo, para o domínio da frequência. Para amostrar um sinal sem que este perca nenhuma das suas características é necessário que ele seja limitado em frequência(Antoniou,2006). A representação neste domínio é designado de Espectro de Frequência.

Por definição temos que a Transformada de Fourier é expressa da seguinte forma:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-iwx} dx \quad (23)$$

Por sua vez, a inversa da Transformada de Fourier será:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{iwx} dw \quad (24)$$

Uma vez que  $i = \sqrt{-1}$  e que  $e^{iwn} = \cos(wn) + isin(wn)$ .

A Transformada de Fourier usa então exponenciais complexas de várias frequências como as suas funções básicas.

### **Transformada de Fourier Discreta (DFT)**

Quando um sinal é discreto e periódico, não precisamos da transformada de Fourier contínua. Em vez disso, usamos a Transformada de Fourier Discreta, ou DFT que é representada pela seguinte expressão:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-i2\pi nk/N} \quad (25)$$

Das seguintes expressões podemos retirar a relação entre a frequência em contínuo e digital:

$$\frac{fs/2}{f_{contínuo}} = \frac{\pi}{f_{digital}} \quad (26)$$

No entanto, para que a representação computacional de uma DFT seja mais simples utiliza-se uma *Fast Fourier Transform* (FFT), como demonstrada na figura 25 (Heckbert,1995).

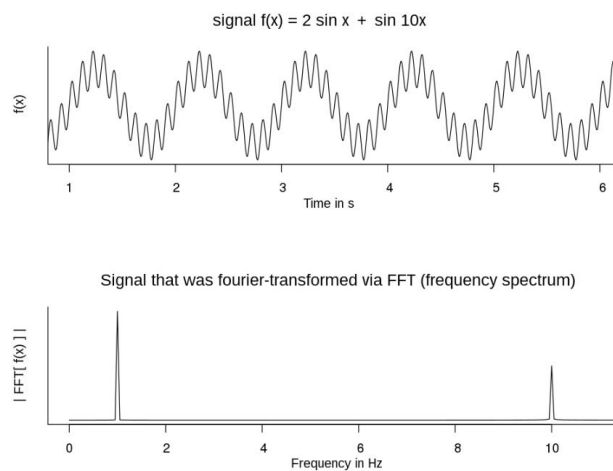


Figura 25-Sinal obtido por uma FFT

## 2.4 Direction of Arrival (DOA)

Um dos focos deste trabalho passa obrigatoriamente por fazer a localização de uma fonte acústica. Neste contexto, é importante descrever os métodos de como este é feito.

O problema de estimar o ângulo de chegada de uma onda plana é designado por problema de estimativa de DOA. Existem vários métodos para resolver o problema da estimativa da a direção de chegada (DOA) de múltiplas fontes utilizando os sinais.

A aplicação do processamento de matrizes requer o conhecimento de um sinal de referência ou a direção da fonte do sinal desejado para atingir os objetivos pretendidos. Um array de sensores, neste caso hidrofones, são amplamente utilizados para resolver o problema da localização da direção(Krishnaveni et al,2013).

A técnica de *Beamforming* é utilizada juntamente com um conjunto de sensores para receber sinais de uma determinada direção espacial especificada na presença de interferências e ruído. Por conseguinte atua como um filtro espacial. Esta técnica é capaz de melhorar o SNR de um sinal recebido e de eliminar interferências indesejadas (Van Veen, 1988).

Um *beamformer* de feixe de recepção é normalmente utilizado para estimar o sinal que chega de uma direção específica na presença de ruído e de sinais de interferência. Num *beamformer* de feixe de recepção a saída do conjunto de sensores é linearmente combinado utilizando coeficientes de filtro espacial (*weight vectors*) de modo a que os sinais provenientes de uma direção desejada sejam passados para a saída do *beamformer* de feixe sem distorção, enquanto os sinais de outras direções são atenuados.

Ao ler o KraitArray com uma amostragem de Nyquist-Shannon e ao transmitir os dados para MatLab podemos estimar apenas um pequeno número de origens. A troca de informações entre sensores pode ser reduzida e ao explorarmos a combinação entre vários hidrofones a uma distância conhecida reduzimos também o número de possíveis origens de um som. Um *beamformer* tradicional no domínio do tempo apresenta vetores de peso (*weight vectors*) que correspondem ao atraso encontrado em cada sensor devido à diferença de trajetória, para que as saídas de cada sensor distribuído espacialmente seja somado de forma coerente para melhorar a recepção do sinal na presença de ruído (Figura 26).

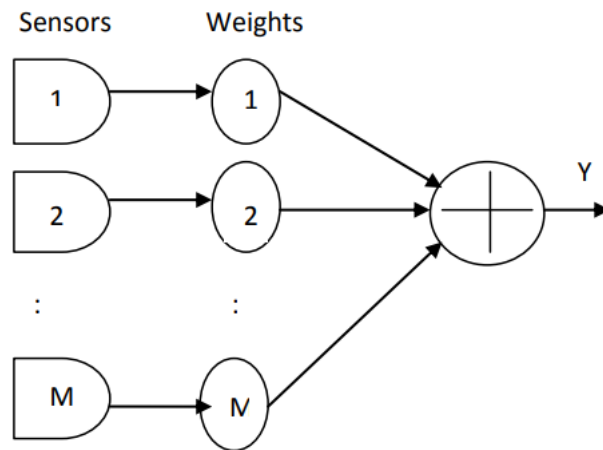


Figura 26-Beamfomer convencional

Fonte: Krishnaveni et al,2013.

Considere-se um array linear com M sensores, com um distanciamento uniforme entre sensores  $d$ . Assumimos que uma fonte de largura de banda estreita está a chegar ao nosso array com um ângulo  $\theta$ , com respeito ao seu eixo e que a fonte está no seu campo distante. Se  $x(t)$  é o sinal que será recebido na origem do sistema de coordenadas, então o sinal que chega aos seus M hidrofones em relação ao instante de tempo  $t$ ,  $x_1(t)$  ..... $x_M(t)$  pode ser descrito como o vetor  $x(t)$  (Krishnaveni et al,2013):

$$x(t) = [x(t - \tau_1), x(t - \tau_2), \dots, x(t - \tau_M)]^T \quad (27)$$

$\tau_1, \dots, \tau_M$  corresponde ao atraso em tempo decorrido do sinal em cada hidrofone devido à diferença de distância percorrida. Para um array com hidrofones linearmente espaçados com distância  $d$ , o atraso em tempo entre cada hidrofone é dado pela seguinte expressão:

$$\tau = (d \cos \theta) / c \quad (28)$$

Em relação ao sonar passivo rebocado utilizado neste trabalho para determinar o ângulo de chegada do som, o KraitArray, o atraso em tempo  $\tau$  pode ser expresso da seguinte forma:

$$\tau = \frac{n_d}{f_s} \quad (29)$$

Em que  $n_d$  corresponde ao intervalo do *bin displacement* entre os dois sinais obtidos através de uma correlação e  $f_s$  a frequência de amostragem.

Se resolvermos a equação (28) em relação a  $\theta$  conseguimos obter o ângulo de chegada ou DOA:

$$\frac{n_d}{f_s} = \frac{d \cos \theta}{c}$$

$$\frac{n_d}{f_s} \cdot c = d \cos \theta \quad (30)$$

$$\frac{\frac{n_d}{f_s} \cdot c}{d(s_2 - s_1)} = \cos \theta$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{\frac{n_d}{f_s} \cdot c}{d \cdot (s_2 - s_1)} \right)$$

Em que  $s_2, s_1$  são as posições escolhidas dos hidrofones. A exatidão do cálculo dos parâmetros é essencial, uma vez que um pequeno erro pode resultar em variações finais substanciais.

## 2.5 Classificação de sinais acústicos

Como pudemos compreender no enquadramento concetual, o CSM faz parte do ciclo OODA e atua nas fases de “observação” e “orientação”. Na etapa “observação”, são utilizados sistemas que permitem detetar se existe algum contacto, identificá-lo e determinar se estamos perante um navio ou submarino indesejado.

Para conseguirmos identificar o contacto que obtivemos, numa determinada direção, temos que recorrer a técnicas de *Data Mining*. Este refere-se ao processo de descoberta de padrões, tendências, correlações ou conhecimentos em grandes volumes de dados. Envolve a utilização de várias técnicas e algoritmos para extrair informações valiosas de conjuntos de dados estruturados ou não estruturados. O objetivo da extração de dados é descobrir conhecimentos ocultos que possam ser utilizados para a tomada de decisões, a previsão e a otimização em vários domínios (Agarwal,2013). Alternativamente, *Data Mining* pode ser visto simplesmente como um conjunto de passos para a obtenção de conhecimento, como podemos ver na figura 27.

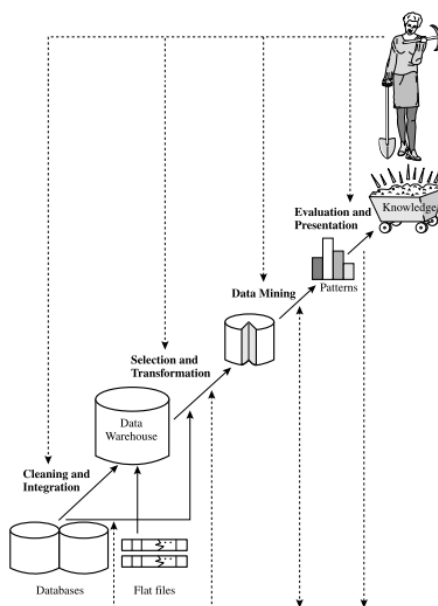


Figura 27- Passos do Data Mining

Fonte: Han et al, 2022, p.6.

O processo iterativo de *Data Mining* é composto por sete fases, sendo as primeiras quatro dedicadas ao pré processamento de dados que serão então utilizadas nas restantes três para obter o conhecimento incoberto(Agarwal,2013).

As fases que constituem são as seguintes (Han et al, 2022, p.7):

1. *Data cleaning*- é efetuada uma remoção de ruídos, ou seja, dados que pela sua natureza não conseguem ser processados nem compreendidos,

muitas vezes associada a erros de medição;

2. *Data integration*- várias fontes de dados são combinadas. Estas são *databases*, *data warehouses* e *transactional data*. A primeira corresponde a um conjunto de dados interligados entre si, enquanto que a segunda armazena os primeiros em estruturas e repositórios com o mesmo esquema, possibilitando um processamento semelhante. O terceiro, por sua vez, refere-se a dados obtidos através de transações, coletando informações individuais das *databases*;
3. *Data selection*- os dados relevantes a analisar para a tarefa serão recuperados das *database*;
4. *Data transformation*- os dados são transformados para formatos mais ajustados para cada software ao serem alvos de operações de agregação ou ainda de redução, com o objetivo de se obterem representações mais pequenas dos dados sem sacrificar a sua integridade. Esta operação de redução de dados será especialmente útil no processamento;
5. *Data mining*- etapa onde são aplicados métodos para extrair padrões nos dados;
6. *Pattern evaluation*- dos padrões extraídos, são retirados aqueles que interessam para a tarefa segundo medidas estabelecidas;
7. *Knowledge presentation*- o conhecimento obtido, por fim, é documentado e utilizado como base para a tomada de decisão.

Das técnicas existentes em *data mining* aquela que interessa para a realização deste trabalho é a técnica de *Machine Learning*. Este refere-se a um subcampo da ciência da computação que se de aprender com a experiência e, assim, melhorar o seu desempenho ao longo do tempo(Russel,2010).

A ideia de que os computadores estão a "aprender" é em grande parte uma metáfora e não implica que os sistemas informáticos estejam a replicar artificialmente os sistemas cognitivos avançados que se pensa estarem envolvidos na aprendizagem.

Pelo contrário, podemos considerar estes algoritmos como aprendizagem num sentido funcional: são capazes de alterar o seu comportamento para melhorar o seu desempenho numa determinada tarefa através da experiência(Witten, 2002).

O *machine learning* é especialmente útil para resolver problemas de predição, ou seja, a aprender critérios de decisão para ser capaz de classificar casos desconhecidos. Sabemos que sinal hidrofónico um tipo de navio produz, alimentamos o sistema com várias amostras do mesmo e também sabemos que sinal produz o ruído ambiente ou um submarino. Repetimos o processo. No final, queremos que o sistema seja robusto o suficiente para distinguir cada tipo de som e assim classificá-lo corretamente de acordo com a sua classe.

Falamos então de problemas de um tipo de aprendizagem designada de supervisionada. Neste tipo de aprendizagem, indicamos ao algoritmo o que deve prever. Fazem parte deste tipo de aprendizagem os problemas de regressão e classificação. Enquanto que os problemas de regressão consistem na previsão de um valor numérico, os de classificação focam-se em dados categóricos.

O objetivo dos problemas de classificação é prever uma classe na qual uma determinada instância de dados se enquadra, ou seja, quando se adquire a informação de um novo contacto detetado pelas nossas barreiras acústicas e esses dados passam pelo ciclo de *data mining*, é feita uma previsão acerca da classe daquele novo sinal hidrofónico (Han et al, 2022, p.286).

Abordaremos abaixo alguns classificadores que foram utilizados para classificar os sinais hidrofónicos. Neste trabalho foram criados sinais sintéticos para serem utilizados nas diversas atividades de campo, como sinais contínuos e *chirps* (sinais em que a frequência vai aumentando ou diminuindo ao longo do tempo dentro de um intervalo de frequência bem definido). Foram também utilizados gravações de navios.

A razão da utilização de sinais sintéticos para experimentação prende-se com o facto de serem facilmente distinguíveis entre eles e o ruído ambiente e também com a maior facilidade de manipulação no seu processamento. Para o efeito da classificação

este será com três classes distintas, utilizando as gravações do hidrofone digitalHyd SR-1(M.Lda,2023) para o efeito. Um *chirp* de 50-2000Hz com a duração de trinta segundos, um seno contínuo de 400Hz e ruído ambiente captado pelo hidrofone.

### 2.5.1 Classificação Bayesiana

A teoria bayesiana fornece um cálculo matemático de graus de probabilidade, descrevendo o que significa para as probabilidades serem consistentes e como elas devem mudar com as evidências(Hanson et al, 1991). Este escolhe a classe mais provável dado um padrão de dados. Os classificadores Baeyianos são classificadores estatísticos.

Dado uma classe  $C$  e um dado  $x$ , podemos formular o teorema de Bayes da seguinte forma:

$$P(C, x) = P(C|x)P(x) = P(x|C)P(C) \quad (31)$$

Dado um  $x$ ,  $P(x)$  é constante. Assim sendo, o classificador de Bayes escolhe a classe que maximiza  $P(x|C)P(C)$  (Hanson et al, 1991).

Um dos classificadores Bayesianos é o de NaiveBayes. Este assume independência entre atributos e costuma ter bons resultados. Este evita que a  $P(x^m, C)$  seja 0, em que  $m$  corresponde à ponderação de um atributo.

$$P(x, C) = \prod P(x^m, C) \quad (32)$$

### 2.5.2 Classificação Árvores de Decisão

Uma árvore de decisão é uma estrutura em árvore semelhante a um fluxograma (Figura 28), em que cada nó representa um teste a um atributo, cada arco representa um resultado do teste e cada folha contém uma etiqueta de classe. O nó mais alto de uma árvore é o nó raiz (Han et al, 2022, p.291).

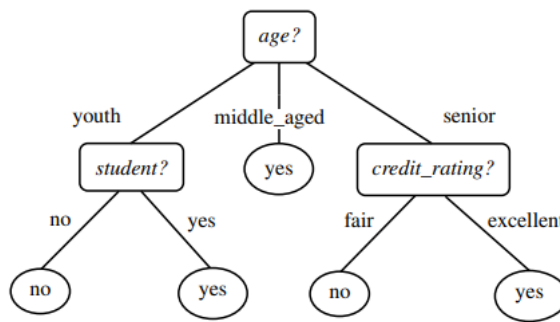


Figura 28-Estrutura típica de uma árvore de decisão.

Fonte: Han et al, 2022, p.291.

A construção de classificadores de árvores de decisão não requer qualquer conhecimento do domínio ou definição de parâmetros, pelo que é adequada para a descoberta de conhecimento. As árvores de decisão podem lidar com dados de elevada dimensão. A sua representação do conhecimento adquirido sob a forma de árvore é intuitiva e geralmente fácil de assimilar pelos seres humanos(Han et al, 2022, p.292).

A indução de árvores de decisão segue um algoritmo básico. Primeiramente, cada nível divide o conjunto de treino em partições alternativas. Segue-se a escolha melhor critério de qualidade para selecionar a partição mais indicada. Volta a repetir o processo até que o critério inicial da escolha da classe seja atingido(Han et al, 2022, p.293).

Uma variação à árvore de decisão são as *random forests*, que combina os resultados de várias árvores de decisão para chegar a um único resultado, ilustrado na Figura 29.

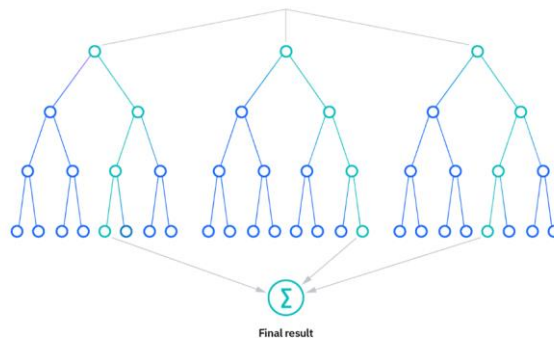


Figura 29- Esquema típico de uma random forest

Fonte: IBM, 2023

Uma das grandes vantagens de *random forest* em detrimento de uma árvore de decisão é a redução do risco de *overfitting*, uma vez que as árvores de decisão têm o vício de utilizarem todos os dados para treino, ou seja, o sistema decora os dados e não aprende o processo iterativo de aprendizagem. Com várias árvores de decisão, esse risco baixa significativamente uma vez que as árvores sem relação vão diminuir a variância e erro de previsão.

No entanto, apresenta algumas desvantagens. São sistemas mais complexos uma vez que utilizam várias árvores de decisão, o que resulta num aumento de potência e armazenamento computacional, bem como o tempo despendido no processo.

### 2.5.3 Classificação Redes Neurais

As redes neurais são uma classe de modelos de *machine learning* inspirados na estrutura e no funcionamento do cérebro humano. São concebidos para aprender padrões e representações a partir de dados, permitindo-lhes fazer previsões, classificar entradas e realizar outras tarefas (Han et al, 2022, p.328).

A arquitetura de uma rede neuronal genérica consiste em nós interligados, chamados de neurónios, organizados em camadas. As três camadas principais são as seguintes e estão ilustradas na figura 30 (Han et al, 2022, p.329):

- Camada de entrada (*input layer*): Recebe os dados brutos de entrada. Cada neurónio desta camada corresponde a uma característica ou

dimensão de entrada.

- Camadas ocultas(hidden layer): Camadas intermédias entre as camadas de entrada e de saída. Estas camadas processam os dados de entrada através de ligações ponderadas.
- Camada de saída(output layer): Produz as previsões ou resultados finais da tarefa da rede neural.

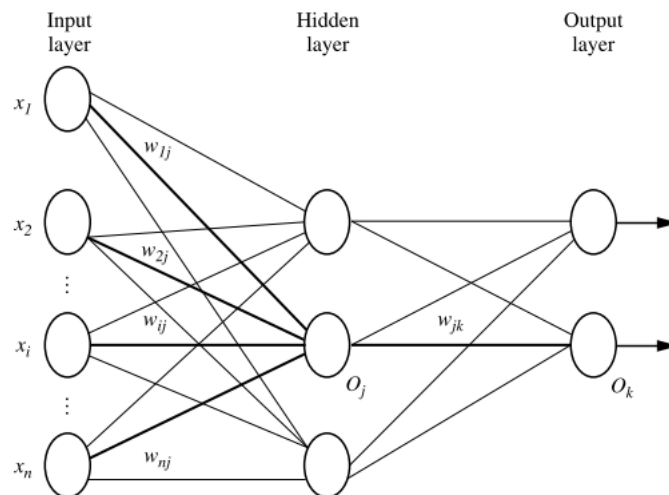


Figura 30- Rede neuronal multi camada feed-forward

Fonte: Han et al, 2022, p.328.

Os neurónios de uma camada estão ligados aos neurónios da camada seguinte através de ligações ponderadas. Cada ligação tem um peso associado  $w$ , que determina a força da ligação. A aprendizagem envolve o ajuste desses pesos para melhorar o desempenho da rede. Sinapses que obtêm bons resultados devem ser reforçadas enquanto que os que levam a resultados menos bons enfraquecidos.

Os pesos da rede são inicializados com pequenos números aleatórios, como por exemplo valores entre -1.0 a 1.0 ou -0.5 a 0.5. Cada número tem um desvio associado(Han et al, 2022, p.331).

Cada conjunto de treino é processado da seguinte forma. Primeiramente, o conjunto de treino entra na camada de entrada, sem alteração. Para uma unidade de entrada  $j$ , a sua produção  $O_j$ , é igual ao seu valor de entrada  $I_j$ . A seguir, são calculadas

as entradas e saídas líquidas de cada unidade nas camadas oculta e de saída são calculadas. A entrada líquida para uma unidade nas camadas oculta ou de saída é calculada como uma combinação linear das suas entradas(Han et al, 2022, p.331).

Dada uma unidade  $j$  numa camada oculta ou de saída, a entrada líquida,  $I_j$  para a unidade  $j$  é descrita pela seguinte expressão:

$$I_j = \sum_i w_{ij} O_i + \theta_j \quad (33)$$

Sendo  $w_{ij}$  o peso da ligação da unidade  $i$  da camada anterior à unidade  $j$ ;  $O_i$  é a saída da unidade  $i$  da camada anterior; e  $\theta_j$  é a polarização da unidade. A polarização atua como um limiar, na medida em que serve para variar a atividade da unidade.

Cada unidade nas camadas oculta e de saída recebe a sua entrada líquida e aplica uma função de ativação, como demonstrado na figura 31. Este processo é designado de *feedforward*(Han et al, 2022, p.332).

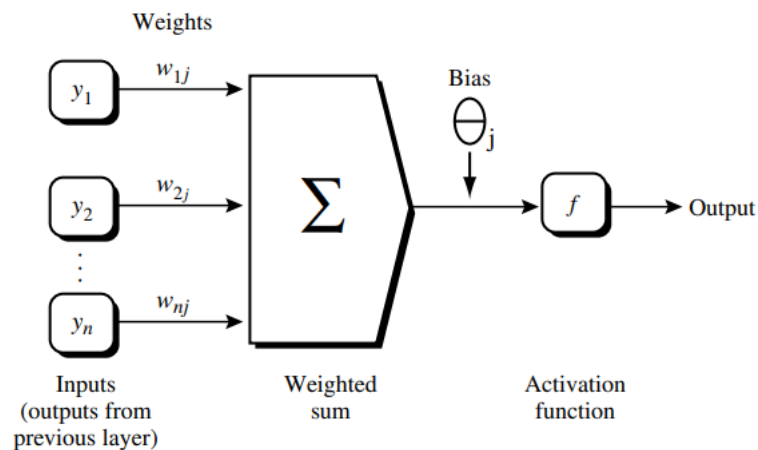


Figura 31- Esquema do funcionamento de uma rede neuronal

Fonte: Han et al, 2022, p.331.

A função de ativação é descrita pela seguinte expressão:

$$O_j = \frac{1}{1+e^{-I_j}} \quad (34)$$

Esta função é particular uma vez que torna um grande domínio de entrada num com uma escala compreendida entre 0 e 1. Esta função, também conhecida como logística ou sigmoide, é não linear e diferenciável permitindo que o algoritmo de *backpropagation* modele problemas de classificação que são linearmente inseparáveis.

O resultado da rede neuronal é comparado com os valores reais através de uma função de perda ou erro, dada pela seguinte expressão:

$$Err_j = O_j(1 - O_j)(T_j - O_j) \quad (35)$$

O erro sofrerá a ação de uma propagação para trás de modo a minimizar a função de perda. O gradiente da perda em relação a cada peso é calculado utilizando a regra da cadeia do cálculo. Este gradiente indica o grau de contribuição de cada peso para o erro.

$$Err_j = O_j(1 - O_j) \sum_k Err_k w_{jk} \quad (36)$$

A rede irá então atualizar os pesos utilizando um algoritmo de otimização para reduzir a perda. A taxa de aprendizagem  $\iota$  controla o tamanho do passo das atualizações dos pesos (Han et al, 2022, p.332). A atualização dos pesos pode ser descrita através da seguinte expressão:

$$\Delta w_{ij} = (\iota) Err_j O_i \quad (37)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \Delta w_{ij} \quad (38)$$

As etapas de *feedforward* e *backpropagation* são repetidas iterativamente durante um número predefinido de épocas ou até a perda convergir para um nível satisfatório e aí obter-se a nossa classificação.



### Capítulo 3- Vigilância Acústica

Nos capítulos introdutórios foi espelhada a necessidade de Portugal possuir uma permanente vigilância marítima nos seus espaços marítimos. Para que tal seja possível, a lacuna da vigilância acústica deve ser colmatada. Atualmente, o garante da soberania e autoridade do estado no espaço subaquático suporta-se na atividade operacional das fragatas e submarinos da Marinha e dos aviões de patrulha aérea marítima da FAP. Todavia, face à imensidão do espaço marítimo nacional e à diminuta atividade dos meios aeronavais não é possível possuir uma capacidade contínua e efetiva de vigilância do espaço submarino. Logo, é necessário possuir sistemas robustos que vigiem permanentemente uma determinada área.

Atualmente, a maioria das barreiras acústicas implementadas baseia-se em sistemas SONAR passivos fixos no fundo do mar (Weir,2006) conectados por cabo a uma estação em terra ou sonares passivos rebocadas (Lemon,2004).

Um dos exemplos mais conhecidos de um sistema SONAR passivo fixo no fundo do mar é o *Sound Surveillance System (SOSUS)*(Weir,2006), desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos da América (EUA) e instalado nos oceanos Atlântico e Pacífico durante a guerra fria para detetar e seguir os submarinos soviéticos (Bruno et al,2023).

Após o fim da guerra fria, os EUA começaram a desenvolver o *Surveillance Towed Array Sensor System (SURTASS)* (Henrick,2018) que utiliza hidrofones rebocados para efetuar a vigilância, tendo como principal vantagem a sua mobilidade, como ilustrado na Figura 32. Ao efetuar a fusão dos dados recolhidos de vários navios (várias fontes de dados), é possível obter um melhor conhecimento do ambiente envolvente.

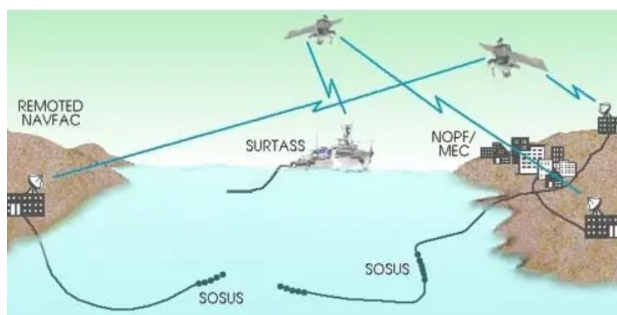


Figura 32- Ilustração do SOSUS e SURTASS.

Fonte: NOAA, 2023.

Entre 2016 a 2019 decorreu um projeto coordenado pelo Instituto Hidrográfico (IH) designado de SUB-ECO. Este projeto visava a edificação de um sistema de vigilância e de previsão do ambiente acústico submarino, ao largo de Portugal continental, a partir da rede de Sistema de Monitorização e Previsão Operacional da Zona Económica Exclusiva (MONIZEE), ilustrado na figura 33, e da capacidade operacional de previsão da circulação oceânica implementada no Instituto Hidrográfico (IH, 2023).

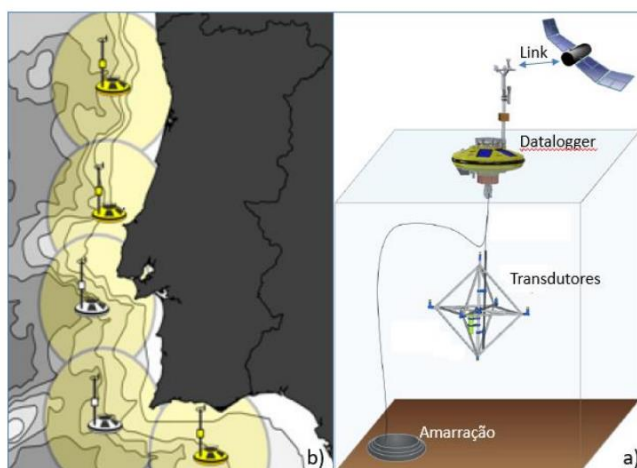


Figura 33-Projeto sub-eco.

Fonte: Marreiros, 2018.

O sensor passivo utilizado é composto por uma geometria de hidrofones dispostos em octaedro com uma abertura de 1,5 metros. Os resultados iniciais da operação deste sistema são promissores (IH, 2023).

Para diversos autores, o termo “barreira acústica” é descrito como um sistema capaz de reduzir a intensidade auditiva de ruído indesejado numa determinada área(Gao,2022),(Kurze,1974). Neste trabalho, uma barreira acústica é considerado como um conjunto de equipamentos passivos, uma rede de sonares passivos, que cobrem uma determinada área e atuam como se uma “teia de aranha” se tratasse. Quando um determinado navio passar numa área em que este equipamento está a cobrir, este será detetado.

Para realizar este trabalho, através do CINAV, teve acesso a vários equipamentos, dos quais de destacar um hidrofone clássico digitalHyd SR-1 (Marsensing,2023), um sonar passivo rebocado experimental Krait Array(S. A. C. P. Company,2023), um projetor de som, um CTD e vários *Fiber Optics Cable*(FOC) com tecnologia DAS (Distributed Acoustic Sensing) (EDF,2021).

O SONAR pode ser utilizado para efetuar a vigilância acústica e pode ser passivo ou ativo (Marage,2013), de acordo com aplicação pretendida. Um SONAR ativo emite um sinal acústico na água. Considera o tempo de propagação do som das ondas refletidas no seu processamento para estimar a distância e a posição de um alvo específico. Para aumentar a probabilidade de sucesso da deteção, é essencial conhecer o ambiente onde a deteção irá provavelmente ocorrer.

No domínio militar, um SONAR ativo apresenta normalmente uma desvantagem, uma vez que pode revelar a localização do navio a um inimigo potencial. Por outro lado, um SONAR passivo não pode estimar a distância a um alvo. No entanto, uma rede de sonares passivos (barreira acústica passiva) pode classificar e triangular a origem de uma fonte sonora, o que constitui uma vantagem essencial durante as operações militares.

Uma barreira acústica passiva pode ser implementada utilizando vários tipos de SONAR dispostos em diferentes configurações. Para conseguir uma melhor vigilância da área, podem mesmo ser implementadas em plataformas móveis, como veículos não tripulados (Rizzuto,2022),que podem recolher dados acústicos sem necessidade de operação humana local. Um sonar passivo rebocado normal (Lemon,2004) tem uma

série de hidrofones que, quando utilizados longe de uma fonte geradora de ruído, pode atingir uma elevada probabilidade de deteção acústica.

Uma vez que pode ser utilizado a diferentes profundidades, podemos otimizar o seu desempenho tendo em conta as características acústicas do oceano para obter melhores taxas de deteção. Uma barreira acústica pode ser construída utilizando múltiplos sonares passivos numa plataforma móvel ou numa posição fixa e pode ser particularmente eficaz se posicionada num *chokepoint*. Um *chokepoint* refere-se a uma localização estratégica ou a uma passagem estreita através da qual o tráfego, as mercadorias, as pessoas ou a informação têm de passar. Este ponto de congestionamento ou controlo pode afetar significativamente o fluxo, a eficiência e a segurança da passagem. Os pontos de estrangulamento ou *chokepoints* podem ser características geográficas físicas, como cursos de água estreitos, passagens de montanha ou pontes, bem como pontos de controlo digitais, como nós de rede ou centros de transferência de dados. Constituem pontos de estrangulamento os portos e os estreitos (Noer, 1996).

O porto de Lisboa, em particular, trata-se de uma infraestrutura crítica que deve ter um sistema de vigilância acústica permanente, não só para vigilância como também como dissuasor de possíveis ameaças. A nível militar, é o porto mais importante do país uma vez que a base naval de Lisboa, se encontra dentro deste. Além disso, Lisboa é a capital do nosso país e é onde se encontram a maioria dos centros de decisão das FFAA e da República Portuguesa.

Os cabos submarinos, constituem outra infraestrutura crítica para garantir a nossa soberania. Dependemos extensamente dos cabos submarinos para mantermos as nossas vias de comunicação. Um dos equipamentos que este trabalho incidiu pode tirar partido diretamente dos cabos submarinos existentes para efetuar vigilância acústica, como veremos abaixo.

### 3.1 Hidrofone clássico DigitalHyd SR-1

Um gravador acústico autónomo contendo um hidrofone, construído pela MarSensing (MarSensing,2023), Figura 34, que usamos como sistema de apoio ao *KraitArray* e ao FOC para confirmar a identificação das fontes sonoras.



Figura 34-DigitalHyd SR-1

Este hidrofone pode ser utilizado em diversas configurações, fundeadas ou rebocadas juntamente com o *KraitArray*. É ideal para implementar em estratégias eficientes de monitorização em várias posições. É também simples de o programar, instalar e recuperar os dados.

Este dispositivo possui uma vasta gama de configurações, incluindo frequências de amostragem e amplitude, sensibilidade, tempos de arranque e duração do ficheiro, entre outros.

Os dados acústicos recebidos são armazenados num cartão amovível, em formato WAV que armazena também todos os parâmetros de configuração para utilização durante a análise dos dados.

O dispositivo é configurado através de uma interface USB com compatibilidade de acesso a partir de vários tipos de sistemas operativos.

O digitalHyd SR-1 é alimentado por uma bateria recarregável de íões de lítio recarregável e é capaz de permanecer ligado durante até 12 horas de aquisição contínua ou vários dias em stand-by. A bateria e o cartão de memória são substituíveis no terreno, para permitir rápida recolocação do hidrofone.

Este equipamento tem uma frequência de amostragem  $f_s$  de 52.734 kHz, que será relevante adiante. Foi com base nos sons captados pelo SR-1 que foi feita a classificação dos efeitos hidrofónicos.

### 3.2 *KraitArray*

Em 2019 foi cedido à Marinha Portuguesa por empréstimo da empresa britânica Systems Engineering & Assessment Ltd (SEA) um sonar passivo rebocado experimental, sobre o qual se desconhecia o seu estado de funcionamento.

Um sonar passivo rebocado concebido e construído pela SEA (SEA Company,2023) para navios de pequenas dimensões, ilustrado na figura abaixo. A versão utilizada foi um modelo experimental inicial com um comprimento de dezoito metros, dezasseis hidrofones e dois sensores não-acústicos para fornecer a temperatura da água, a profundidade e o rumo do conjunto (Figura 35 e 36).



Figura 35-KraitArray

Durante as suas operações, utilizámos também um cabo de reboque de cem metros para o afastar da fonte sonora do navio e poder aumentar o SNR. Cada hidrofone

é digitalizado com níveis de 24 bits e todos os dados são transferidos para um computador em tempo real através de uma simples ligação Ethernet.



Figura 36- *KraitArray*. Testes iniciais de laboratório.

Por ser um modelo experimental, a complexidade da sua operação foi elevada. O que estava disponível era o equipamento em si, um script defeituoso que não permitia ligar o *towed array*. Não existia informação técnica nem manuais.

Posto isto, foram necessárias diversas reuniões com o fabricante e escrever o próprio código em MATrix LABoratory (MATLAB), que está no Apêndice A. Foram escritos diversos guiões para serem utilizados no procedimento experimental, que indicam passo a passo o que fazer para ligar e fazer a leitura do *KraitArray*, que também se encontram em apêndice.

Este equipamento nunca tinha sido utilizado no âmbito da Marinha Portuguesa, pelo que foi utilizado pela primeira vez na elaboração desta dissertação. O equipamento estava disponível para o trabalho e eram necessárias efetuar diversas tarefas. Primeiramente, confirmar que o *KraitArray* funcionava. Aprender como funciona e deixar tudo relatado para que quem continuasse o trabalho tivesse uma base. Escrever software para extrair informação e por fim verificar o quão bom é a detetar contactos e a determinar o DOA.

Dito isto e com base na diminuta informação, é possível afirmar que foi realizada uma verdadeira engenharia reversa. O seu princípio de funcionamento foi desvendado através da análise da sua estrutura, função e operação.

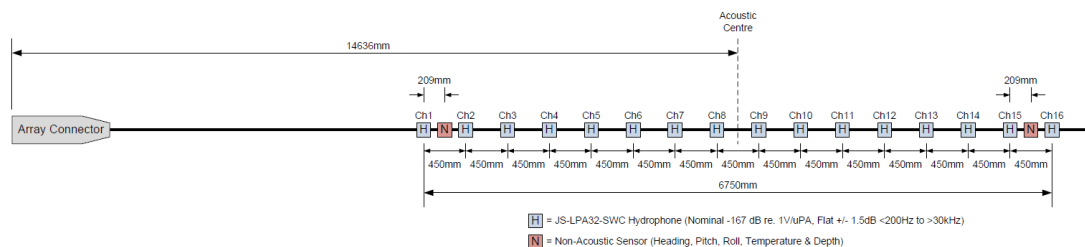


Figura 37- Esquema do Array.

Fonte: SEA Company, 2023.

Este tipo de equipamento é capaz de fornecer capacidade ASW a navios mais pequenos e multifuncionais, apresentam custos iniciais e operacionais reduzidos e permitem a utilização deste equipamento em várias plataformas distintas mesmo que não sejam para ASW. Além disso, têm um baixo peso e oferecem pouca resistência na água. Em contrapartida, não apresenta um *software* intuitivo e fácil de operar uma vez que se trata de um modelo experimental e todo o software foi escrito durante o decurso deste trabalho. Além disso, apresenta alguns desafios no armazenamento e processamento de dados a bordo da plataforma rebocadora.

A plataforma rebocadora ao ser um AUV traz algumas vantagens em detrimento dos navios convencionais e que fazem com que esta seja uma opção válida. Permite uma maior manobrabilidade em espaços reduzidos, uma maior autonomia para a recolha de dados, custos reduzidos de operação, uma diminuição do risco uma vez que o fator humano não entra em linha, um impacto ambiental baixo e um rápido destacamento para uma área determinada (Blidberg, 2001).

Este equipamento apresenta um leque variado de aplicações, como se pode ver na Figura 38. Pode ser utilizado a reboque, mas também estático na vertical ou na horizontal. Ao utilizá-lo em modo estático, necessita de uma ligação a terra por cabo.

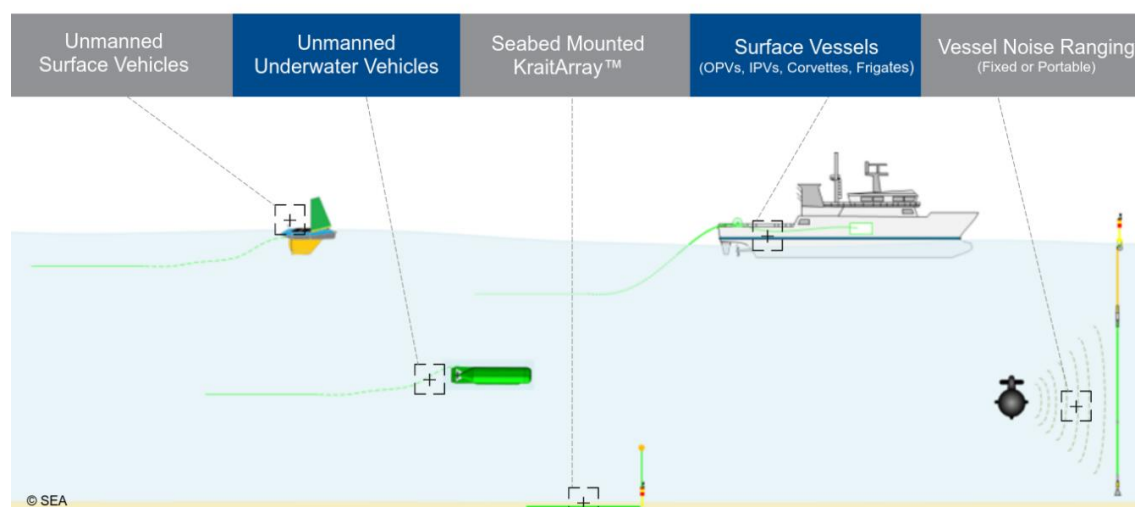


Figura 38- Aplicações KraitArray.

Fonte: SEA Company, 2023.

### 3.1 Conductivity, Temperature, and Depth (CTD)

Este sensor é utilizado para inferir o perfil de propagação do som de propagação do som, medindo a condutividade e a temperatura da água de acordo com a profundidade. O guião para a sua utilização encontra-se em Apêndice G.

### 3.2 Projetor de som

Utilizado para gerar sinais acústicos subaquáticos (fonte sonora) para deteção e seguimento (Figura 39). O guião para a sua utilização encontra-se em Apêndice G.

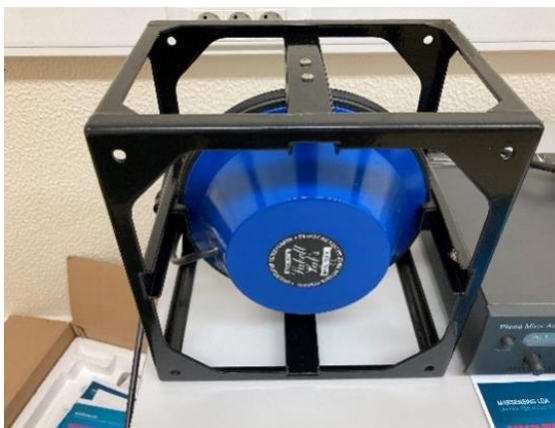


Figura 39- Projetor de som

### ***3.5 Fiber Optics Cable***

Neste domínio, será introduzida neste trabalho uma tecnologia muito promissora, eficaz e de baixo custo, em comparação com as existentes, denominada *Distributed Acoustic Sensing* (DAS), que foi inicialmente desenvolvida para fornecer soluções de monitorização para a indústria do petróleo e do gás(Ekechukwu,2021), bem como para a Geofísica(Nathaniel et al,2017).

Desde os anos 80, sabe-se que um FOC normalmente utilizado para as telecomunicações pode também ser utilizado para detetar pressão mecânica ou ondas acústicas que incidem sobre o cabo. Devido ao seu processo de fabrico, a fibra de vidro contém centros de dispersão distribuídos ao longo da fibra. Estes centros de dispersão refletem parcialmente a luz que atravessa o núcleo do FOC, sendo o fenómeno conhecido por dispersão de Rayleigh(Zhan,2020). A pressão mecânica aplicada ou as ondas acústicas que incidem sobre o FOC induzem alterações nos centros de dispersão, o que leva a uma alteração da dispersão de Rayleigh na fibra de vidro.

Esta tecnologia baseia-se no C-OTDR (Coherent Optical Time Domain Reflectometry)( Liokumovich,2015). Uma fonte laser muito coerente envia um impulso laser através do núcleo da FOC. A luz é dispersa nas flutuações de densidade. A distância

entre estes centros de dispersão varia com as ondas sonoras que incidem no cabo, e o sinal medido varia de forma sincronizada.

Este último atua como uma série de milhares de "hidrofonos virtuais" distribuídos ao longo do seu comprimento, podendo ser utilizados para aplicações de monitorização. A possibilidade de a tecnologia DAS detetar navios a partir do ruído dos seus motores foi revelada indiretamente através da utilização de dados de instalações DAS para monitorizar cabos elétricos submarinos, ilustrado na figura 40(Martin et al,2017).

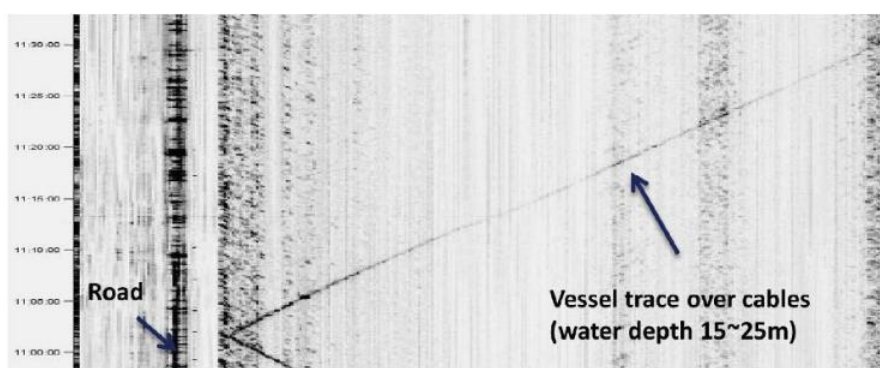


Figura 40- Rasto de um navio sobre a tecnologia DAS utilizada para monitorizar cabos elétricos submarinos

Fonte: European Comission, 2022.

Esta tecnologia pode transformar dezenas de quilómetros de FOC, instrumentada apenas numa das extremidades, numa rede de sensores acústicos extremamente densa. Como a luz incidente se propaga através do núcleo da fibra qualquer perturbação devida à alteração dos parâmetros físicos (temperatura, vibração, tensão) afeta o comprimento, o diâmetro e o índice de refração do núcleo da fibra, ilustrado na Figura 41.

Estes efeitos fazem com que a luz incidente seja refratada, sendo depois detetada na extremidade recetora. A amplitude e a mudança de fase do sinal disperso é interpretado como a amplitude e a localização da perturbação, portanto, dos parâmetros físicos ao longo do comprimento da fibra. A perda de atenuação da luz, a

excitação de modos e a dispersão estão diretamente relacionadas com o tipo de fibra utilizada(Martin et al,2017).

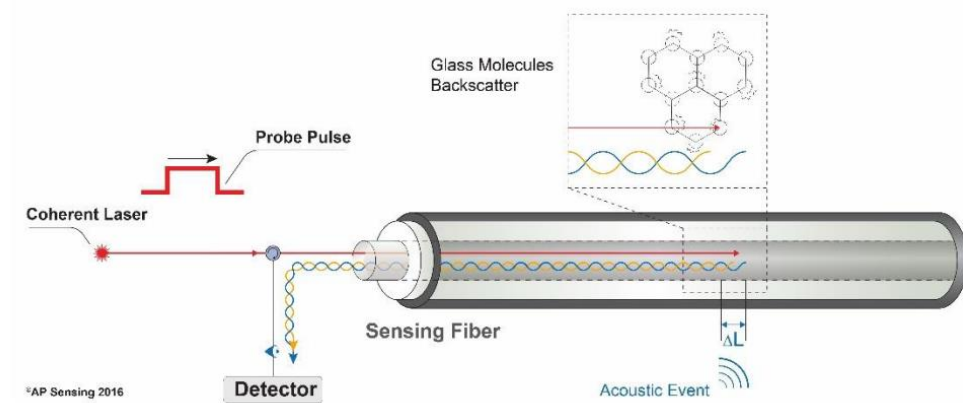


Figura 41-Backscattering sobre uma vibração acústica

Fonte: AP Sensing, 2023.

O sistema DAS proposto segue um conceito modular e é composto por duas unidades, a unidade de interrogador ótico (IU) (Figura 41) e a unidade de processamento de dados (DPU). As vibrações ou ondas acústicas que incidem sobre a fibra ótica dão início a uma expansão ou compressão do cabo de fibra, o que leva a uma alteração da intensidade da luz dispersa. Enquanto o pulso de laser está a viajar pela fibra e a sondar cada parte da fibra, o evento acústico pode ser localizado através de uma medição do tempo de voo (TOF) (European Comission, 2022).



Figura 42-Interrogador DAS

Este equipamento fornece uma alternativa aos sensores acústicos empenhados em vigilância acústica e tanto pode ser utilizado em pontos de estrangulamento ou em águas abertas para proteger infraestruturas críticas como cabos submarinos, portos e bases navais.

As vantagens da utilização desta tecnologia em detrimento dos sensores acústicos tradicionais são inúmeras e pode muito bem revolucionar a forma como a vigilância acústica se desenrolará na próxima década. As principais vantagens que destaque são que a tecnologia DAS pode tornar longos quilómetros de FOC numa rede densa de sensores acústicos com espaçamentos entre 5 a 10m, o que significa que um cabo de fibra ótica de 6km forma uma array linear de 600 a 1200 sensores. A fibra além disso, pode ser interrogada ao longo de 70 ou mais km a partir de uma única extremidade. Esta tecnologia pode ser utilizada nos cabos de fibra ótica já existentes de

comunicações, o que permite uma redução substancial dos custos e uma possibilidade de vigilância numa área bastante extensa. Por fim e a característica que considero completamente diferenciadora, é que a tecnologia DAS é totalmente autónoma, ou seja, a fonte de luz nunca é exposta a nada além do meio que está a ser medido. Por conseguinte, é uma tecnologia passiva sem influências externas nas medições. Por fim, esta é sensível a alterações de tensão e, assim, um navio ou submarino pode ser detetado não só pelo ruído do seu motor, mas também pela deslocação da água que produz um gradiente de pressão que também se propaga para o fundo do mar (European Comission, 2022).

## Capítulo 4- Resultados Experimentais

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição pormenorizada das campanhas para a recolha dos dados e são descritos os procedimentos utilizados no processamento dos dados.

### 4.1 *Robotics Exercise*

O *Robotics Exercise* promovido pela Marinha Portuguesa contou com a participação da Escola Naval, através do seu Centro de Investigação Naval, durante os dias 06/09/2022-08/09/2022 nas instalações do Ponto de Apoio Naval de Tróia, onde atualmente se encontra o Centro de Experimentação Operacional da Marinha e a zona livre tecnológica.

#### 4.1.1 Descrição

Em 2019 foi cedido à Marinha Portuguesa por empréstimo da empresa britânica Systems Engineering & Assessment Ltd (SEA) um sonar passivo rebocado experimental, sobre o qual se desconhecia o seu estado de funcionamento.

Na sequência de um pedido do Comando Naval (através do CEOV), para aferir a operacionalidade do *towed array*, assim comumente designado, foram realizados testes, inseridos no exercício REX-22.

Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos para o exercício REX-22:

1. Aferir o funcionamento do *Towed Array*.
2. Recolher dados acústicos seguindo um planeamento de fiadas e posteriormente, efetuar o seu processamento de sinal.
3. Realizar testes com o novo projetor de som adquirido em 2019 sob a égide do CINAV.
4. Efetuar rotinas com diversos equipamentos tais como o hidrofone autónomo SR1, e a sonda CTD.
5. Testes a um sistema de controlo remoto de um lancha Semirígida.

A preparação do exercício revelou ser bastante desafiante uma vez que o *towed array* era uma versão experimental, o que conseqüentemente apresentava algumas imprecisões no seu software, que foram colmatadas com várias reuniões com o fabricante do equipamento.

Além disso, alguns elementos por motivos de férias não estiveram presentes na sua preparação e nos três dias de exercício, em que o primeiro foi dedicado à ambientação.

Para este exercício disponhamos do seguinte material:

1. Krait Array (2 PELI cases);
2. Duas (2) baterias para alimentação elétrica do array;
3. DolphinEar (hidrofone pequeno para poder monitorizar o áudio em tempo real);
4. DigitalHyd SR-1 + Cabo de amarração;
5. Sistema de Som (Amplificador + Projetor);
6. Conductivity, Temperature and Depth (CTD);
7. Computador Dell “Guerreiros da acústica” – Embarcação – Aquisição de dados do Krait Array.

Tem que ter o software WireShark e do Krait Array (Empresa Sea - Systems Engineering & Assessment Ltd);

8. Computador “Latitude” – Terra – Ligado ao sistema de som;
9. Cabos para baixar o projetor e fazer o reboque do DigitalHyd SR-1 e Krait Array (material existente no “balde de cabos de acústica”);
10. - Extensões elétricas, carregadores para os computadores e baterias.

O planeamento das fiadas consistiu na semirrígida seguir as fiadas representadas na Figura 43, sendo que todas começaram 500jj antes da ponta do cais, e terminaram 1000jj depois desse ponto (tendo assim um comprimento total de 1500jj). O rumo adotado foi próximo de 323. As fiadas foram feitas a 100jj (A), 200jj (B), 400jj (C), 800jj

(D). No entanto o planeamento não foi seguido à justa pois a bordo da embarcação não disponhamos de nenhum equipamento que nos desse a posição em relação ao cais.

Para registar a posição foi utilizado um Garmin GPS tracker, que posteriormente foi descarregado e, após processado, foi correlacionado com a hora das posições para mais tarde se fazer o processamento de sinal.

Para dinamizarmos o tempo disponível foi efetuado um ziguezague pelas 4 fileiras, começando na primeira de Sul-Norte, depois a segunda de Norte-Sul e assim sucessivamente.



*Figura 43- Zona de operação, incluindo as fiadas previstas*

Estava previsto o Krait Array ser rebocado através de uma embarcação do tipo semirrígida com propulsão a jato da Célula de Experimentação Operacional de Veículos Não Tripulados (CEOV), o que não se verificou devido a implicações logísticas, tendo para o efeito sido utilizado uma embarcação do tipo “zebro 3”, tendo percorrido diversas fiadas, captando sons diferentes. A velocidade de reboque foi de aproximadamente 3 nós.

O CTD foi operado diariamente para se obter a verdadeira velocidade do som na água, tendo sido obtido o seguinte valor médio, 1523m/s (Figura 44). Será este o valor que será utilizado para calcular o DOA. O perfil em profundidade torna-se irrelevante para o efeito que se pretendeu e pelo facto de em tão pouca profundidade a velocidade do som ter pouca variação, como demonstrado na figura abaixo.

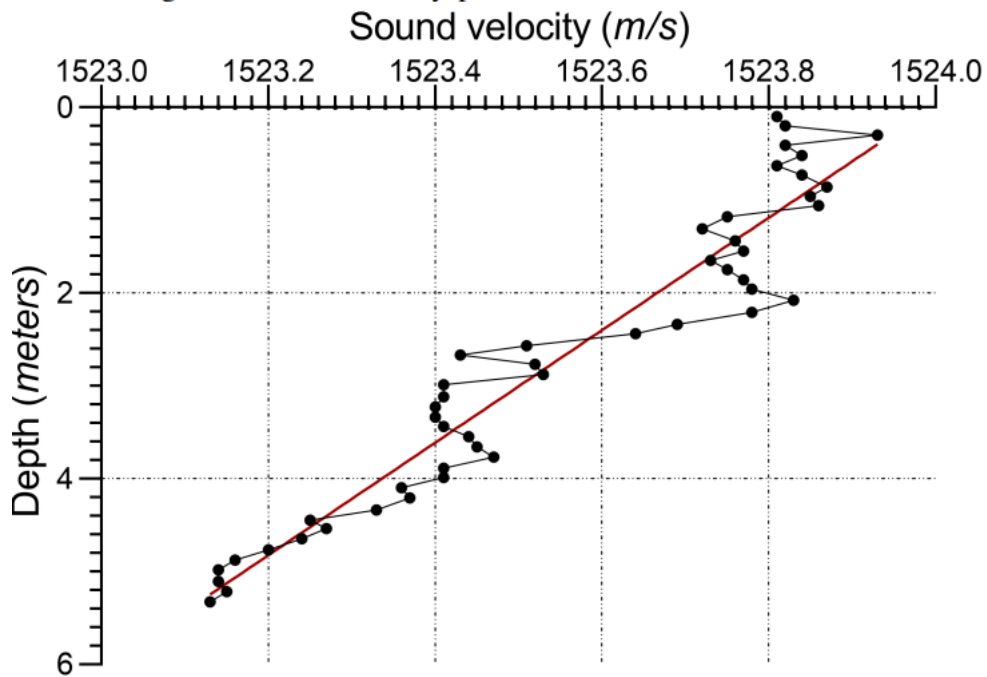


Figura 44- Perfil da VPSA no REX22

Com uma diminuição linear da velocidade, a trajetória do som é aproximadamente circular (e virado para baixo), e o raio sonoro esperado para o perfil de velocidade do som obtido é aproximadamente  $R \approx 1523/6.06 \approx 251.32$  m. O som irá então refratar para cima e para baixo entre o fundo lamacento e a superfície.

Foram usados 3 sons diferentes, gerados a partir de ficheiros WAV do computador "latitude" em terra, que manda o sinal de áudio para sistema de som. Os sinais transmitidos foram os seguintes:

- a. Tom puro contínuo de 220 Hz (220Hz.wav);

b. Chirp pulsado de 220Hz a 880Hz (2 segundos) seguido de 3 segundos de silêncio (chirp.wav);

c. Navio não especificado (navio.wav).

Durante o exercício foram também captados sons de alvos de oportunidade como alguns ferries que por terem AIS conseguiremos cruzar a sua posição e hora com os dados acústicos.

#### 4.1.2 Processamento de dados

Para obter a direção de chegada (DOA) dos sinais acústicos e compará-los com os dados de referência (Figura 45) obtidos pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS), identificámos o sinal (chirp) recebido e calculámos a correlação entre os sinais recebidos em diferentes hidrofones do conjunto. Uma vez que assumimos que o som se comporta como uma onda plana, a correlação dá-nos o deslocamento no tempo necessário para que a onda chegue a um hidrofone diferente. Como temos dezasseis hidrofones, calculámos esta correlação utilizando vários hidrofones para validar a precisão dos resultados. Devido às características físicas do conjunto rebocado utilizado, cada canal (hidrofone) está separado por uma distância de 0,45 metros.

Após obter os parâmetros necessários, o ângulo DOA pode ser facilmente calculado da seguinte forma:

$$\theta = \arccos \left( \frac{\frac{n_d \cdot c}{f_s}}{d \cdot (s_2 - s_1)} \right) \quad (39)$$

Em que  $\theta$  é o ângulo DOA,  $n_d$  é o *bin displacement* entre os dois sinais obtidos utilizando a operação de correlação,  $c$  é a velocidade do som em m/s,  $f_s$  é a frequência de amostragem em Hz,  $d$  é a distância física entre dois hidrofones consecutivos (assumindo que todos os hidrofones estão igualmente espaçados) e  $s_1$  e  $s_2$  são as posições escolhidas para os hidrofones.

A exatidão do cálculo dos parâmetros é essencial, uma vez que um pequeno erro pode resultar em variações finais substanciais. A zona de exercício tinha muito ruído

ambiente, o que inicialmente conduziu a resultados erróneos, fazendo-nos duvidar da praticabilidade do sistema.

No entanto, ao ouvir os sons, verificámos o que deveria ter sido óbvio desde o início: o ângulo de chegada só fazia sentido quando o som do chirp era claramente mais forte do que o ruído ambiente. Por este motivo, para os nossos testes preliminares, seleccionámos um intervalo de 1 segundo durante a receção do sinal de *chirp*. Repetimos as medições em vários locais.

Embora os resultados fossem aceitáveis em vários locais, os resultados foram naturalmente obtidos num ângulo quase perpendicular entre a direção do conjunto rebocado e a do som. Para obter uma base de referência razoável, testámos várias configurações de hidrofones diferentes. Concluimos que os melhores resultados foram obtidos utilizando dois hidrofones espaçados por quatro posições no meio do conjunto rebocado. No entanto, para confirmar a fiabilidade dos resultados, calculámos a correlação temporal de todos os pares de hidrofones espaçados de quatro posições, ou seja, 1 e 4, 2 e 5, etc. Para os 12 pares possíveis, a correlação máxima ocorreu com um deslocamento de 1 posição, exceto para dois pares com 0 e 4 de deslocação. Ignorando estes dois *outliers*, o ângulo de chegada calculado é de 86°, que é exatamente o ângulo obtido utilizando as posições GPS da Figura 48.

O código MatLab, em desenvolvimento, utilizado para esta operação encontra-se em apêndice.

$$\theta = \arccos \left( \frac{\frac{12.1}{15.10000} \cdot 1523}{0,45 \cdot (4)} \right)$$

$$\theta \cong 86^\circ$$



Figura 45- Cálculo do DOA utilizando o ground-truth data

### 4.1.3 Conclusão

Os testes desenvolvidos serviram para testar a operação do Krait Array, verificando que é possível captar adequadamente o som produzido, em águas muito pouco profundas, que foi processado de modo a detetar a origem do som. Adicionalmente testou-se pela primeira vez na água o projetor de som, e o resultado de rebocar um DigitalHyd SR-1, permitindo assim explorar um vasto leque de equipamentos que poderão mais tarde ser a génese para a implementação de uma barreira acústica no porto de Lisboa.

Durante o decorrer do exercício foram identificados os seguintes aspetos a melhorar:

1. Os botes revelaram-se muito instáveis e inadequados para a configuração a bordo. Operar um computador no bote é um desafio muito grande pois o bote é pouco resistente a condições de mar adversas. Além disso, torna-se pequeno para os equipamentos todos. Sugere-se uma embarcação maior, com equipamentos de controlo de posição próprios.
2. A alimentação do Krait Array era fornecida por duas baterias de 12V ligadas em paralelo o que perfazia um total de 24V. O computador, que dispõe de bateria própria esgotou-se no último dia, originando o término do exercício mais cedo. Torna-se necessário instalar um transformador nas baterias de 12V para, também, alimentar o pc.

3. Seja arranjada uma solução para permitir o acesso ao pontão e à extremidade do cais durante operações de voo.
4. Sejam esclarecidas as condições para emissões acústicas na bacia do Sado.

Em suma, o exercício Naval-Rex permitiu confirmar o bom funcionamento do *Towed Array* e a sua capacidade de detetar vários contactos, reais e provocados pelo projetor de som, bem como verificar a atitude do array durante o reboque. Foram recolhidos dados acústicos com o *Towed Array* em ambiente controlado, e pré-determinado de acordo com um plano, permitindo o seu posterior processamento com várias técnicas de processamento de sinal. Além disso, confirmou-se o bom funcionamento do projetor de som, do hidrofone SR1, e do equipamento CTD.

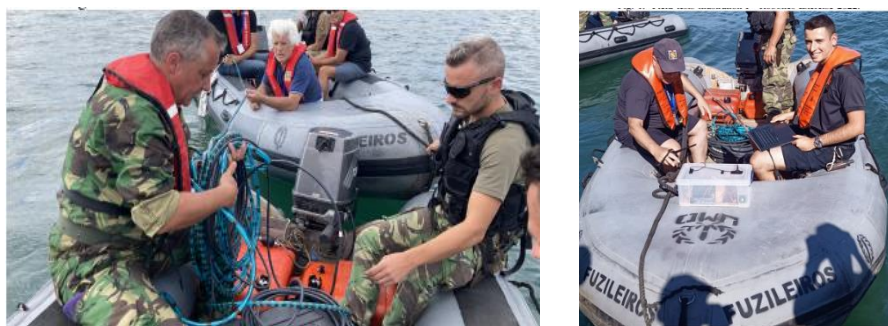


Figura 45- Testes experimentais.

## 4.2 *Fibersense*

O projeto *Fibersense* é financiado pela European Defense Fund (EDF) e tem vários parceiros europeus. No âmbito deste projeto, o CINAV foi responsável por coordenar os primeiros testes em ambiente real em Tróia, no Centro de Experimentação Operacional da Marinha (CEOM), no qual tive empenhado no planeamento, coordenação, execução e a relatar o exercício que será descrito no procedimento experimental.

### 4.2.1 Descrição

Para este exercício foram definidos os seguintes objetivos:

- Verificar a configuração do equipamento DAS;
- Utilizar um projetor de som como fonte de sinal (gama de frequências

e amplitudes);

- Recolher dados preliminares do DAS e de outros sensores e compará-los;
- Organizar a passagem de pequenas embarcações;
- Verificar a configuração para a implementação da FOC;
- Testar abordagens de instalação de cabos e adquirir mais experiência para a definição da configuração para os outros testes;
- Testar diferentes tipos de FOC (apertado, blindado, espiral);
- Testar diferentes abordagens de implementação da FOC (fundo do mar e enterrada).

Estes equipamentos foram previamente fixos ao fundo com o auxílio de uma equipa de mergulhadores, na configuração ilustrada na figura 46.



Figura 46- Zona de operação e configuração esquemática da implementação.

Estes equipamentos foram previamente fixos com o auxílio de uma equipa de mergulhadores. Para este exercício, foram utilizados mais uma vez sons sintéticos. Os sinais transmitidos foram os seguintes:

- a. Tom puro contínuo de 400Hz (400Hz.wav);
- b. Chirp pulsado de 50Hz a 2000Hz (30 segundos) (chirp.wav);
- c. Navio não especificado (navio.wav).

O exercício consistiu em utilizar vários tipos de FOCs e ver qual deles apresentava melhores resultados. Este exercício decorreu numa semana de fenómeno de marés vivas, o que significa que a amplitude de maré era bastante alta, originando fortes correntes de maré. A força das correntes de maré obrigou a equipa a utilizar uma janela de tempo estreita para trabalhar durante as marés altas e baixas.

Os cabos estavam fixos a um cabo de aço, por meio de braçadeiras, que foi previamente colocado no fundo com a geometria de um triângulo. Devido à forte corrente que se fez sentir e ao trabalho dos mergulhadores, um dos cabos partiu-se e exigiu que a equipa trabalhasse para voltar a unir os chicotes. Posto isto, testou-se várias configurações, como por exemplo enterrar o FOC na areia, ilustrado na figura 48.

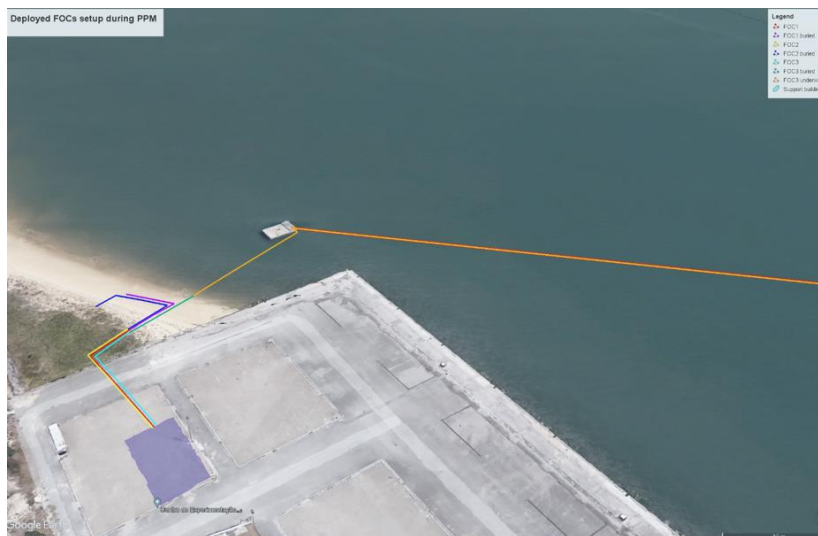


Figura 48- Diferentes configurações FOC

Os dados registados diariamente foram analisados e os resultados preliminares foram positivos, apontando para a utilização de FOCs diretamente implementados no fundo do mar ou enterrados na areia para obter os melhores resultados. Findado o exercício, um dos FOC e o interrogador DAS foram levados para a EN, onde pude efetuar

algumas medições no tanque de arquitetura naval e inteirar-me do seu funcionamento (Figura 49). Os gráficos obtidos da experimentação no tanque da arquitetura naval encontram-se em Apêndice D.



Figura 49- Experimentação em ambiente controlado

Neste exercício foi uma vez mais utilizado o hidrofone SR-1 para termos de comparação, uma vez que é um hidrofone bastante fiável a captar o som. Com base nas gravações do SR-1 neste exercício foi desenvolvido um modelo de classificação de sinais hidrofónicos. Estava previsto também a instalação do KraitArray em modo estático mas devido a problemas técnicos não foi possível operá-lo.

#### **4.2.2 Processamento de dados**

Para a classificação de sinais hidrofónicos foram utilizadas as gravações do SR-1 do exercício Fibersense. Para o fim da classificação e demonstração do conceito, foram utilizados 3 classes distintas. Um tom puro contínuo de 400Hz , um chirp pulsado de 50Hz a 2000Hz (30 segundos) e ruído ambiente. Abaixo estarão apresentados os espectrogramas para cada som captado pelo SR-1, nas Figuras 50-52.

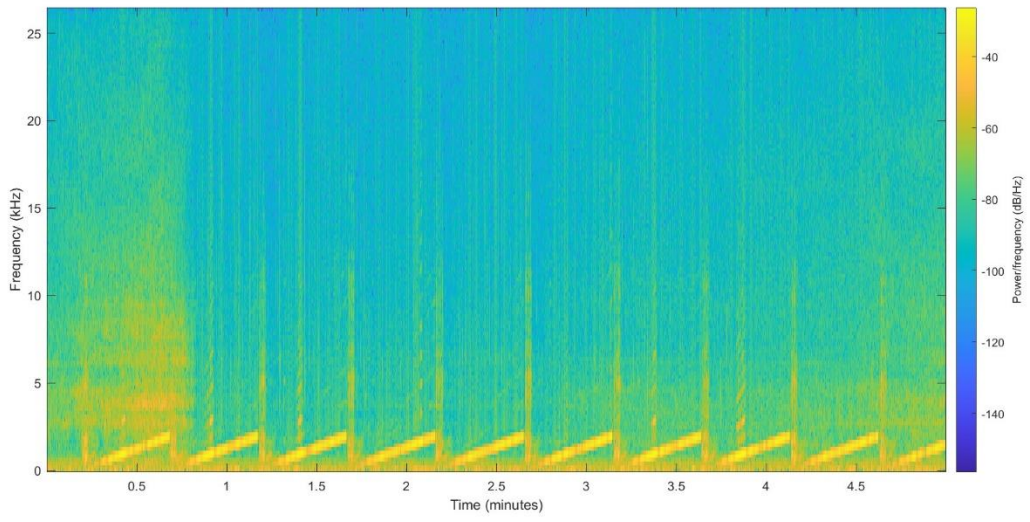


Figura 50- Espectrograma Chirp 50-2000Hz

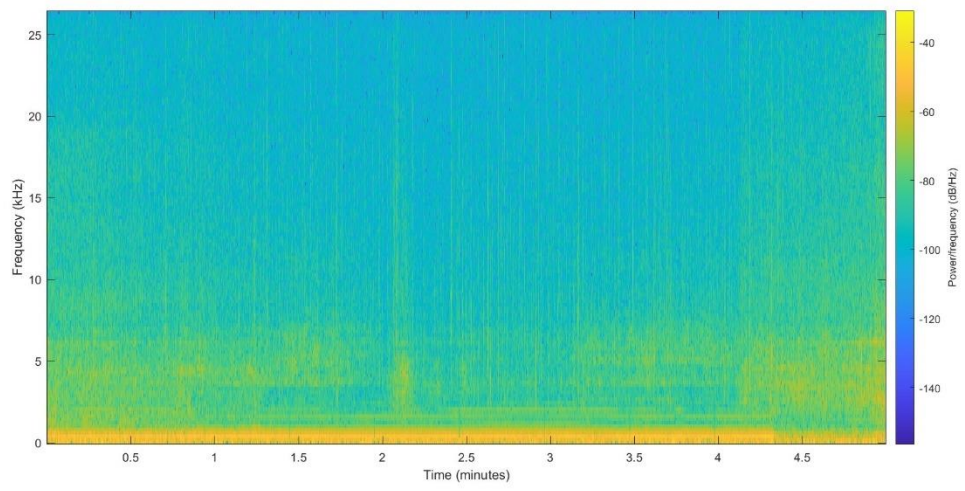


Figura 51- Espectrograma Tom Puro Contínuo 400Hz

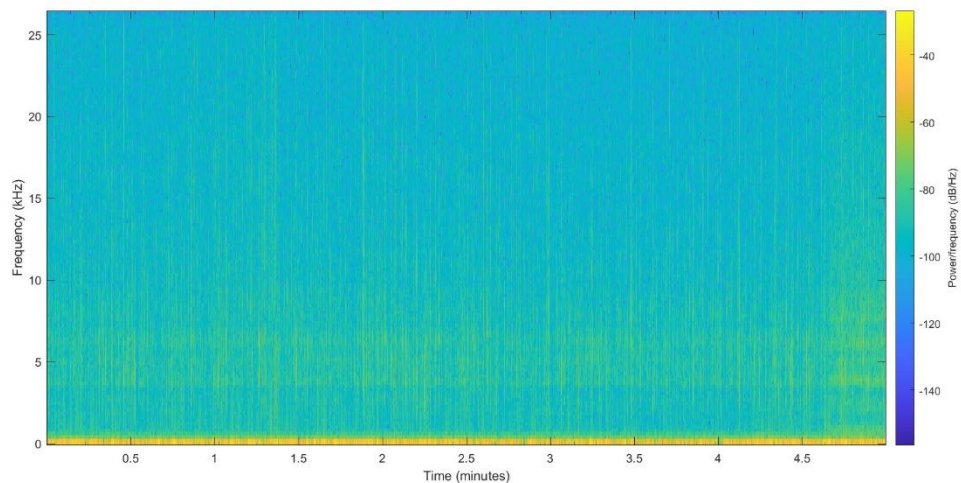


Figura 52- Espectrograma Ruído Ambiente

Como podemos constatar pelos espectrogramas acima, o hidrofone SR-1 é bastante fiável a captar o som produzido pelo gerador de som e por isso será utilizado para a classificação.

O programa Weka foi utilizado para a classificação uma vez que a sua utilização é bastante intuitiva e não requer que o utilizador escreva o seu código. Foram utilizados vários modelos diferentes para realizar a classificação. Só serão apresentados aqueles que apresentaram melhores resultados e que foram descritos no enquadramento teórico.

Para avaliar performance foram utilizados os métodos de *cross validation* e *holdout*. Ambas as técnicas envolvem a divisão de um conjunto de dados em subconjuntos de treino e de teste, mas têm abordagens e objectivos diferentes.

O método *holdout* é uma técnica simples em que o conjunto de dados original é dividido em duas partes: um conjunto de treino e um conjunto de teste (ou validação). O modelo é treinado no conjunto de treino e depois avaliado no conjunto de teste. A divisão básica pode ser, por exemplo, 66% dos dados para treino e 34% para teste (Han et al, 2013).

O método de *cross validation* é uma técnica mais robusta que aborda algumas das limitações do método *holdout*. Envolve a partição do conjunto de dados em vários subconjuntos ou "dobras". O modelo é treinado e avaliado várias vezes, sendo cada dobra utilizada como conjunto de teste enquanto as restantes dobras são utilizadas para treino. Isto ajuda a garantir que o desempenho do modelo é calculado em média em diferentes subconjuntos de dados (Han et al, 2013).

O método de *cross validation* utilizado foi o de *k-Fold Cross-Validation*. O conjunto de dados é dividido em *k* subconjuntos (ou dobras), e o modelo é treinado e avaliado *k* vezes. Em cada iteração, uma dobra é usada para testar e as outras são usadas para treinar. A média da métrica de desempenho final é calculada sobre as *k* iterações. Por exemplo, com um *k* de 10 o modelo treina com 9 subconjuntos e testa com 1 e repete este processo 10 vezes com dados diferentes.

Para a classificação extraiu-se um vetor de 128 características com os espectros de baixa frequência dos primeiros 3 segundos do ficheiro de ondas dado. O ficheiro é gravado com uma frequência amostral de 52kHz. Ignorou-se também as primeiras 100 amostras e a partir daí criaram-se ficheiros de 3s. Foram criados 98 ficheiros de cada som, o que dá um total de 294 instâncias. Dos 128 atributos, o último representa a classe do som, em que a- Sine b-Chirp c-Noise. Além disso, o código MatLab exporta os ficheiros .wav para um .csv para poderem ser tratados pelo WEKA.

### **Árvore de decisão**

Com uma árvore de decisão J48 e utilizando o método *holdout* com uma divisão de 66% obtem-se os seguintes resultados:

Corretamente classificadas instâncias: 95%

Incorretamente classificadas instâncias: 5%

Com a respetiva matriz de confusão:

```
=== Confusion Matrix ===
```

```
  a  b  c  <-- classified as
31  0  1 | a = Sine
 3 28  0 | b = Chirp
 1  0 36 | c = Noise
```

Podemos também visualizar a estrutura da sua árvore de decisão.

```
f16 <= 28.736094
|   f63 <= 2.453295
|   |   f21 <= 7.668936
|   |   |   f115 <= 1.455444
|   |   |   |   f17 <= 9.403417
|   |   |   |   |   f16 <= 9.81853: Noise (95.0)
|   |   |   |   |   f16 > 9.81853
|   |   |   |   |   |   f2 <= 76.967252: Sine (2.0)
|   |   |   |   |   |   f2 > 76.967252: Noise (2.0)
|   |   |   |   |   |   f17 > 9.403417: Chirp (5.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   f115 > 1.455444
|   |   |   |   |   |   |   f23 <= 5.029338: Sine (6.0)
|   |   |   |   |   |   |   f23 > 5.029338: Chirp (4.0)
|   |   |   |   |   |   |   f21 > 7.668936
|   |   |   |   |   |   |   |   f40 <= 1.190081: Sine (4.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   f40 > 1.190081: Chirp (18.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   f63 > 2.453295: Chirp (71.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   f16 > 28.736094: Sine (87.0/1.0)

Number of Leaves :    10

Size of the tree :    19
```

## NaiveBayes

Com o modelo de classificação NaiveBayes e o método de avaliação de desempenho *holdout* com uma divisão de 66% obtemos-se os seguintes resultados:

Corretamente classificadas instâncias: 97%

Incorretamente classificadas instâncias: 3%

Com a respetiva matriz de confusão:

```
=== Confusion Matrix ===
```

```
  a  b  c  <-- classified as
32  0  0 | a = Sine
 2 29  0 | b = Chirp
 1  0 36 | c = Noise
```

## Rede Neuronal

Com o modelo de classificação *Multilayer Perceptron* e o método de avaliação de desempenho de *cross validation* com k=10 obtemos os seguintes resultados:

Corretamente classificadas instâncias: 91.85%

Incorretamente classificadas instâncias: 7.15%

Com a respetiva matriz de confusão:

```
=== Confusion Matrix ===
      a  b  c  <-- classified as
93   5  0 | a = Sine
13  82  3 | b = Chirp
 0   0 98 | c = Noise
```

Deste modo, podemos concluir que obtivemos os melhores resultados na classificação utilizando um modelo de Naive Bayes. Esta pode dever-se a diversos fatores. Um classificador de Naive Bayes assume a independência dos atributos, é incremental ou seja, pode ir atualizando as suas estimativas.

Uma vez feita a deteção do contacto e após saber do que se trata, ao classificá-lo, conseguimos ter a base para a implementação de uma barreira acústica passiva.

### 4.2.3 Conclusão

Este exercício permitiu confirmar o bom funcionamento da tecnologia DAS e treinar várias configurações de barreiras acústicas utilizando esta tecnologia inovadora. Esta é mais uma das tecnologias que poderá muito bem ser implementada nas nossas águas, com especial foco junto a infraestruturas críticas. Os resultados iniciais são promissores e demonstram que é possível captar adequadamente um som emitido.

Além de confirmar que esta tecnologia é adequada para a nossa prova de conceito, pudemos recolher dados utilizando o SR-1 que serviu de base para a nossa classificação, sobre a qual apresentou resultados positivos.

Como recomendações para próximos exercícios semelhantes sugere-se treinar mais configurações com diferentes tipos de cabos, utilizando mesmo cabos de comunicação submarina e em diferentes áreas, testando a configuração por longos períodos de tempo e compreender se é robusta.



## Conclusões e Trabalho Futuro

Ao longo deste trabalho procurou-se desenvolver tarefas que permitam responder à questão levantada nos objetivos. De todas estas, as mais importantes são a que dizem respeito à aquisição e processamento de dados utilizando hidrofones e o teste de diversas configurações de barreiras acústicas com os equipamentos disponíveis;

Os resultados experimentais descritos neste trabalho demonstram que com um sistema combinando os sensores de baixo custos aqui tratados é possível fazer a detecção e classificação de alvos e assim compreender se estamos a lidar com navios ou submarinos indesejados, em águas muito pouco profundas. Ao georreferenciar os dados obtidos com os cálculos efetuados, podemos concluir que o ângulo de chegada DOA pode ser detetada com baixo erro. Além disso, a classificação apresenta resultados bastante positivos.

Como barreira acústica passiva a solução poderá passar por usar um FOC com tecnologia DAS a cobrir toda a extensão de uma barra e utilizar o *KraitArray* rebocado por AUVs ou por diferentes navios.

É essencial dispor de um sistema de vigilância acústica passiva que emita alertas em tempo real de possíveis ameaças, permitindo mais tempo para reagir e aumentando a possibilidade de tomar a decisão correta. Com este conhecimento, otimizar os recursos de vigilância, uma vez que podemos concentrar os esforços em áreas específicas de interesse.

Este trabalho apresenta algumas limitações como a utilização do mesmo local para as gravações dos sinais acústicos, bem como o número reduzido de diferentes sinais e navios gravados. Além disso, o cálculo do DOA foi feito utilizando apenas um par de hidrofones e o respetivo *software* não é de simples utilização. No que diz respeito ao Fibersense, não foi testado esta tecnologia com cabos de fibra para comunicação nem sobre longos períodos de tempo e com maiores comprimentos.

O trabalho futuro deve-se centrar na utilização de mais hidrofones para realizar uma melhor fusão de dados e implementar este sistema utilizando veículos não tripulados para implementar uma barreira acústica passiva de alto desempenho para vigilância com custos acessíveis. Além disso, testar a tecnologia DAS por longos períodos de tempo, em zonas mais profundas e realizar testes com FOCs de comunicações. O foco futuro, também deve incidir no desenvolvimento de um software mais user-friendly para operar e classificar os dados captados pelo *KraitArray* e o FOC.

## Referências Bibliográficas

- Agarwal,S. (2013, December). Data mining: Data mining concepts and techniques. In *2013 international conference on machine intelligence and research advancement* (pp. 203-207). IEEE.
- APSensing, 2023. [Emlinha] Disponível em:  
<https://www.apsensing.com/technology/the-fifth-generation-das>
- AR, 2005. Lei Constitucional n.º 1/2005, Sétima revisão constitucional. Diário da República, 1ª série, n.º 155, 12 agosto, pp. 4642-4686.
- AR, 2009. Lei Orgânica n.º 1-A/2009, Aprova a Lei Orgânica de Bases da Organização das Forças Armadas. Diário da República, 1ª série, n.º 129, 7 julho, pp. 4344(2)-4344(9).
- Andersson, S. (2008). *Modelling of Wave Propagation in Shallow Water Environment*. Norwegian University of Science and Technology
- AML Oceanographic,2018 . "SV vs. CTD." *AML Oceanographic | Remove Unpredictability from Your Marine Operations*, Magento2 Store,. [Em linha] Disponível em:  
<https://amloceanographic.com/blog/post/sv-vs-ctd>. [Acedido em 06 agosto 2023].
- Adhitama, M. R. (2019). Geopolitics of Portugal in Atlantic Sea. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, (6), pp. 48-52.
- Antoniou, A. (2006). *Digital signal processing*. McGraw-Hill.
- Apel, J. R. (1987). *Principles of ocean physics*. Academic Press.
- Bilaniuk, N. and Wong, G. S. K. (1993). Speed of sound in pure water as a function of temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 93, No. 3, pp. 1609-1612

- Blanco, S. (2021). The Mar-Portugal Plan: How Portugal's Action Plan to Transition into a Maritime Economy May Prove Challenging within the Current International Regulatory Framework for Deep Sea Mining. *J. Int'l Bus. & L.*, 21, 68.
- Blidberg, D. R. (2001, May). The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. In *Ieee Icra* (Vol. 4, No. 1, pp. 122-129).
- Boyd, J. R., 2010. The Essence of Winning and Losing. [Em linha] Disponível em: [http://www.expertsecho.com/johnboyd/johnboyd\\_docs/Essence\\_of\\_Winning\\_and\\_Losing.pdf](http://www.expertsecho.com/johnboyd/johnboyd_docs/Essence_of_Winning_and_Losing.pdf) [Acedido em 02 agosto 2023].
- Bruno, F. A., Janneh, M., Gunda, A., Kyselica, R., Stajanca, P., Werzinger, S., ... & Cusano, A. (2023). Fiber Optic Hydrophones for towed array applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 160, 107269.
- Chen, C-T, and Millero, F.J. [1977]. Speed of sound in seawater at high pressures. The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 62, No. 5, pp. 1129-1135.
- Crocker, M. J. (1998). *Handbook of acoustics*. John Wiley & Sons.
- EDA,(2023). Maritime surveillance. [Em linha] Disponível em: [https://eda.europa.eu/what-we-do/all-activities/activities-search/maritime-surveillance\(marsur\)#:~:text=The%20main%20objective%20of%20MARSUR,improve%20interoperability%20and%20co%2Doperation](https://eda.europa.eu/what-we-do/all-activities/activities-search/maritime-surveillance(marsur)#:~:text=The%20main%20objective%20of%20MARSUR,improve%20interoperability%20and%20co%2Doperation) [Acedido em 03 de agosto de 2023].
- Ekechukwu, G.K., Sharma, J.(2021) Well-scale demonstration of distributed pressure sensing using fiber-optic DAS and DTS. *Sci Rep* 11, 12505. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91916-7>
- European Comission, 2022. Directorate-General for Defence Industry and Space.
- Emmerson, C., & Stevens, P. (2012). Maritime choke points and the global energy system. *Charting a Way Forward, Chatham House Briefing Paper, London, 4*.

- FREIXO, M. J. V. (2011). METODOLOGIA CIENTÍFICA: FUNDAMENTOS, MÉTODOS E TÉCNICAS. 3.A ED. INSTITUTO PIAGET.
- Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B., & Hou, H. (2022). Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Advanced Materials Technologies*, 7(6), 2100698.
- Han, J., Pei, J., & Tong, H. (2022). *Data mining: concepts and techniques*. Morgan kaufmann.
- Hansen, C. H. (2001). Fundamentals of acoustics. *Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control. World Health Organization*, 1(3), 23-52.
- Hanson, R., Stutz, J., & Cheeseman, P. (1991). *Bayesian classification theory* (No. NAS 1.15: 107885).
- Henrick, R. F. (2018). Surtass twinline. *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST*, 34(2), 179-193.
- Heckbert, P. (1995). Fourier transforms and the fast Fourier transform (FFT) algorithm. *Computer Graphics*, 2(1995), 15-463.
- Hovem, J. M. (2011). *Ray trace modeling of underwater sound propagation. Documentation and use of the PlaneRay model*.
- Hughes, T. (1998). Vessel traffic services (VTS): Are we ready for the new millenium?. *The Journal of Navigation*, 51(3), 404-420.
- IUM, 2019. Orientações Metodológicas para a Elaboração de Trabalhos de Investigação. Caderno N.º 8, 2ªedição. Lisboa: IUM.
- IBM,2023. [Em linha] Disponível em: <https://www.ibm.com/topics/random-forest#:~:text=Random%20forest%20is%20a%20commonly,both%20classification%20and%20regression%20problems> [Acedido em 18 de agosto de 2023].

- Krishnaveni, V., Kesavamurthy, T., & Aparna, B. (2013). Beamforming for direction-of-arrival (DOA) estimation—a survey. *International Journal of Computer Applications*, 61(11).
- Kurze, U. J. (1974). Noise reduction by barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55(3), 504-518.
- Lemon, S. G. (2004). Towed-array history, 1917-2003. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(2), 365-373.
- Liokumovich, L. B., Ushakov, N. A., Kotov, O. I., Bisyarin, M. A., & Hartog, A. H. (2015). Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: Signal model under static fiber conditions. *Journal of Lightwave Technology*, 33(17), 3660-3671.
- Lobo, V., & Moura-Pires, F. (1995). Ship noise classification using Kohonen Networks. *Proc. of the Engineering Applications of Neural Networks-EANN*, 95.
- Lobo, V., Bandeira, N., & Moura-Pires, F. (1998, June). Ship recognition using distributed self organizing maps. In *Engineering Benefits from Neural Networks. Proceedings of the International Conference EANN'98* (pp. 326-9).
- M. Lda. (2023), “Tecnologias marinhas e acustica submarina,” [Em linha] Disponível em: <https://www.marsensing.com>
- Marreiros, J. (2018). Vigilância acústica dos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição nacional.
- M. Robards, G. Silber, J. Adams, J. Arroyo, D. Lorenzini, K. Schwehr, and J. Amos. (2016). “Conservation science and policy applications of the marine vessel automatic identification system (ais)—a review,” *Bulletin of Marine Science*, vol. 92, no. 1, pp. 75–103.

Marage, J. P., & Mori, Y. (2013). *Sonar and underwater acoustics*. John Wiley & Sons.

Marques, A. & Correia, A., (2012). Conhecimento Situacional Marítimo. Em: A. S. R. A. G. M. N. S. M. Vitor Lobo Cajarabille, ed. *A Segurança no Mar - Uma visão holística*. Aveiro: Mare Liberum - Editora para a FEDRAVE, pp. 187-220.

Martin, E., Biondi, B., Karrenbach, M. & Cole, S.. (2017). Continuous Subsurface Monitoring by Passive Seismic with Distributed Acoustic Sensors - The “Stanford Array” Experiment.

NATO, 2013. AAP-06 NATO Glossary of terms and definitions (english and french), s.l.: NATO Standardization Agency.

Nathaniel J. Lindsey, Eileen R. Martin, Douglas S. Dreger, Barry Freifeld, Steve Cole, Stephanie R. James, Biondo L. Biondi, Jonathan B. Ajo-Franklin.(2017) “Fiber-optic network observations of earthquake wavefields”. American Geophysical Union.

Nejat, I. A., Topuz, E., Panayirci, E. & Isik, E., 1998. Principles of Integrated Maritime Surveillance Systems. 1ª ed. New York: Springer Science+Business, LLC.

NOAA, 2023. [Em linha] Disponível em: <https://www.noaa.gov/>

Noer, J. H., & Gregory, D. (1996). *Chokepoints: Maritime Economic Concerns in the Southeast Asia* (pp. 63-66). Washington, DC: National Defense University Press.

Park, D., Kwak, K., Chung, W. K., & Kim, J. (2015). Development of underwater short-range sensor using electromagnetic wave attenuation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(2), 318-325.

PCM, 2002. Decreto-lei n.º 43/2002 de 2 de março. Diário da República, 1ª série-A, 2 março, pp. 1750-1752.

Premus, V. E., Abbot, P. A., Kmelnitsky, V., Gedney, C. J., & Abbot, T. A. (2022). A wave glider-based, towed hydrophone array system for autonomous, real-time, passive

acoustic marine mammal monitoring. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(3), 1814-1828.

Roarty, H. J., Smith, M., Glenn, S. M., Barrick, D. E., Whelan, C., Page, E., ... & Weingartner, T. (2013, April). Expanding maritime domain awareness capabilities in the Arctic: High frequency radar vessel-tracking. In *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)* (pp. 1-5). IEEE.

Rousseau, E., & Felbacq, D. (2020). Concept of a generalized law of refraction: a phenomenological model. *ACS photonics*, 7(7), 1649-1654.

Russell, S. J. (2010). *Artificial intelligence a modern approach*. Pearson Education, Inc..

Rizzuto, E., & Ruggiero, V. (2022, September). Remote Passive Acoustic Barrier with Maritime Unmanned Systems: Preliminary Tests During REPMUS-21. In *Technology and Science for the Ships of the Future: Proceedings of NAV 2022: 20th International Conference on Ship & Maritime Research* (Vol. 6, p. 287). IOS Press.

SEA Company. (2023) "Independent systems engineering & software company,". [Online]. Available: <https://www.sea.co.uk/>

Sedunov, A., Salloum, H., Sutin, A., Sedunov, N., & Tsyuryupa, S. (2018, October). UAV passive acoustic detection. In *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)* (pp. 1-6). IEEE.

Stergiopoulos, S. (Ed.). (2017). *Advanced signal processing handbook: theory and implementation for radar, sonar, and medical imaging real time systems*. CRC press.

Oder, T. (2018). The Dimensions of Russian Sea Denial in the Baltic Sea. *Center for International Maritime Security*, 1.

Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill Inc.

Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE assp magazine*, 5(2), 4-24.

Weir, G. E., & Center, U. N. H. (2006). The American sound surveillance system: using the ocean to hunt Soviet submarines, 1950–1961. *International Journal of Naval History*, 5(2), 20p.

Witten, I. H., & Frank, E. (2002). Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. *Acm Sigmod Record*, 31(1), 76-77.

Wilson, W. D. (1960). Equation for the speed of sound in sea water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32(10), 1357-1357.

Zhan, Z (2020). Distributed Acoustic Sensing Turns Fiber-Optic Cables into Sensitive Seismic Antennas. *Seismological Research Letters* 91 (1): 1–15. [Em linha] Disponível em: <https://doi.org/10.1785/0220190112>

Zheng, S., Cao, X., Tong, F., Zhang, G., & Dong, Y. (2018, December). Performance evaluation of acoustic network for underwater autonomous vehicle in confined spaces. In *2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)* (pp. 1-4). IEEE.

Zhu, C., Garcia, H., Kaplan, A., Schinault, M., Handegard, N. O., Godø, O. R., ... & Ratilal, P. (2018). Detection, localization and classification of multiple mechanized ocean vessels over continental-shelf scale regions with passive ocean acoustic waveguide remote sensing. *Remote Sensing*, 10(11), 1699.

# Apêndices

## Apêndice A- Código MatLab KraitArray

### Krait\_array\_read.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Krait Array Trials
%Krait_array_read.m
%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt
%André Dias - andre.rodrigues.dias@marinha.pt
%Last update - 03/07/2023
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initialization - Pre-Program
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%NUMPOINTS = 30000/16; %Number of
%NUMUDPPACKETS = 29141;
NUMUDPPACKETS = 6000;
NUMPOINTS = NUMUDPPACKETS*15;
NCHANNELS = 16; %Number of channels -
[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]
%NCHANNELS = 32; %Number of channels -
[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]
SAVE_WAV = 1; %SAVE == 1 // NO_SAVE == 0
SAVE_RESULTS = 1; %SAVE == 1 // NO_SAVE == 0
SAMPLING_RATE_CALCULATION = 20; %Packets used to calculate the sampling rate
per channel
DIVIDE_CHANNELS = 20; %Divide each channel 24

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Aux Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
COUNT_POINTS = 1000; %Count cycle points
temp_data=zeros(SAMPLING_RATE_CALCULATION,1); %Initialize frequency
calculation variable
temp = 1; %Concatenate array - Temporary variable

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initilization - Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

Hydro_1 = zeros(NUMPOINTS,NCHANNELS); %Initialize Hydrophones variable - Each
column is one hydrophone
Hydro_2 = zeros(NUMPOINTS*NCHANNELS,1); %Initialize Hydrophones variable -
All saved sequentially
%".wav" files
FILENAME_CH_1 = 'Channel_1.wav'; %Channel 1
FILENAME_CH_2 = 'Channel_2.wav'; %Channel 2
FILENAME_CH_3 = 'Channel_3.wav'; %Channel 3
FILENAME_CH_4 = 'Channel_4.wav'; %Channel 4
FILENAME_CH_5 = 'Channel_5.wav'; %Channel 5
FILENAME_CH_6 = 'Channel_6.wav'; %Channel 6
FILENAME_CH_7 = 'Channel_7.wav'; %Channel 7
FILENAME_CH_8 = 'Channel_8.wav'; %Channel 8
FILENAME_CH_9 = 'Channel_9.wav'; %Channel 9
FILENAME_CH_10 = 'Channel_10.wav'; %Channel 10
FILENAME_CH_11 = 'Channel_11.wav'; %Channel 11
FILENAME_CH_12 = 'Channel_12.wav'; %Channel 12
FILENAME_CH_13 = 'Channel_13.wav'; %Channel 13
FILENAME_CH_14 = 'Channel_14.wav'; %Channel 14
FILENAME_CH_15 = 'Channel_15.wav'; %Channel 15
FILENAME_CH_16 = 'Channel_16.wav'; %Channel 16
FILENAME_CH_ALL = 'Channel_ALL.wav'; %All Channels in a single ".wav" file
FILENAME_CH_ALL_NORM = 'Channel_ALL_NORM.wav'; %All Channels in a single
".wav" file
FILENAME_CH_HYDR = 'Hydro_Values.mat'; %Save Hydrophone values
FILENAME_CH_HYDR_CONC = 'Hydro_Values_concatenated.mat'; %Save Hydrophone
values

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Communications
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u = udpport("LocalPort",51001); %UDP connection
u.InputBufferSize = 1504000000; % UDP Buffer
fopen(u) %Open connection
u.flush(); %Clean Buffer

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtain automatically the Sampling Rate - Difference between 2 packets
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u.flush(); %Clean Buffer
%Acquire some packets - "Time of day in ns"
for i=1:SAMPLING_RATE_CALCULATION
    count_read=0;
    disp('estou a escuta');
    while count_read==0
        [data, count_read] = fread(u, 1464, 'uint8');
    end
    disp('comecei a ler');
    temp_data(i,1)=data(21)*(2^24)+data(22)*(2^16)+data(23)*(2^8)+data(24);
end

%Calculate mean sampling rate
SAMPLE_RATE_calculated = round(15/(mean(diff(temp_data))*10^-9));
SAMPLE_RATE = 10000;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Main - Hydrophone Values

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
u.flush(); %Clean Buffer

NUMPOINTS = 0;
index_jump = 96;

%for k=1:NUMPOINTS %Number of samples
for k=1:NUMUDPPACKETS %Number of UDP Packets
    data = fread(u, 1464, 'uint8');

    index = 0;

    %NUMPOINTS = NUMPOINTS + 15

    %Show point counter
    %if(mod(k,COUNT_POINTS) == 0)
    %    k
    %end

    for sets=1:15

        NUMPOINTS = NUMPOINTS + 1;

        for j=1:NCHANNELS

            %Save the packet content to a variable - Each column is one hydro
            m=(j-1)*3;

            %Hydro_1(k,j) =
            data(25+m+index)*65536+data(26+m+index)*256+data(27+m+index);
            Hydro_1(NUMPOINTS,j) =
            data(25+m+index)*65536+data(26+m+index)*256+data(27+m+index);

            %Concatenate values - To save a single ".wav" file
            %Hydro_2(temp,1) = Hydro_1(k,j);
            Hydro_2(temp,1) = Hydro_1(NUMPOINTS,j);

            % Convert from signed int to number
            %if(Hydro_1(k,j) >= 2^(23))
            % %Hydrophone values
            % Hydro_1(k,j) = - (2^(24) - Hydro_1(k,j));
            % %Concatenate
            % Hydro_2(temp,1) = Hydro_1(k,j);
            %end
            if(Hydro_1(NUMPOINTS,j) >= 2^(23))
                %Hydrophone values
                Hydro_1(NUMPOINTS,j) = - (2^(24) - Hydro_1(NUMPOINTS,j));
                %Concatenate
                Hydro_2(temp,1) = Hydro_1(NUMPOINTS,j);
            end
            %Aux variable - concatenate values
            temp=temp+1;
        end
        index = index + index_jump
    end
end

```

```

    end % NO SETS
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure()
plot(Hydro_1)

figure()
plot(Hydro_2)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Save data into "wav" file
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Save all data into ".wav" file
if(SAVE_WAV == 1)
    %Delete older files - Check if it is important later
    if(exist('Channel_1.wav')==2)
        delete Channel_1.wav
    end
    if(exist('Channel_2.wav')==2)
        delete Channel_2.wav
    end
    if(exist('Channel_3.wav')==2)
        delete Channel_3.wav
    end
    if(exist('Channel_4.wav')==2)
        delete Channel_4.wav
    end
    if(exist('Channel_5.wav')==2)
        delete Channel_5.wav
    end
    if(exist('Channel_6.wav')==2)
        delete Channel_6.wav
    end
    if(exist('Channel_7.wav')==2)
        delete Channel_7.wav
    end
    if(exist('Channel_8.wav')==2)
        delete Channel_8.wav
    end
    if(exist('Channel_9.wav')==2)
        delete Channel_9.wav
    end
    if(exist('Channel_10.wav')==2)
        delete Channel_10.wav
    end
    if(exist('Channel_11.wav')==2)
        delete Channel_11.wav
    end
    if(exist('Channel_12.wav')==2)
        delete Channel_12.wav
    end
    if(exist('Channel_13.wav')==2)
        delete Channel_13.wav
    end
end

```

```

end
if(exist('Channel_14.wav')==2)
delete Channel_14.wav
end
if(exist('Channel_15.wav')==2)
delete Channel_15.wav
end
if(exist('Channel_16.wav')==2)
delete Channel_16.wav
end
if(exist('Channel_ALL.wav')==2)
delete Channel_ALL.wav
end

%Save new files
switch NCHANNELS
case 1
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 2
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 3
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 4
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_4,int16(Hydro_1(:,4)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 5
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_4,int16(Hydro_1(:,4)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_5,int16(Hydro_1(:,5)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 6
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_4,int16(Hydro_1(:,4)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_5,int16(Hydro_1(:,5)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_6,int16(Hydro_1(:,6)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
case 7
audiowrite(FILENAME_CH_1,int16(Hydro_1(:,1)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_2,int16(Hydro_1(:,2)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_4,int16(Hydro_1(:,4)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_5,int16(Hydro_1(:,5)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_6,int16(Hydro_1(:,6)),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_7,int16(Hydro_1(:,7)),SAMPLE_RATE);

```





```

audiowrite(FILENAME_CH_3,int16(Hydro_1(:,3)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_4,int16(Hydro_1(:,4)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_5,int16(Hydro_1(:,5)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_6,int16(Hydro_1(:,6)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_7,int16(Hydro_1(:,7)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_8,int16(Hydro_1(:,8)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_9,int16(Hydro_1(:,9)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_10,int16(Hydro_1(:,10)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_11,int16(Hydro_1(:,11)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_12,int16(Hydro_1(:,12)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_13,int16(Hydro_1(:,13)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_14,int16(Hydro_1(:,14)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_15,int16(Hydro_1(:,15)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_16,int16(Hydro_1(:,16)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE);
audiowrite(FILENAME_CH_ALL,int16(Hydro_2(:,1)/DIVIDE_CHANNELS),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Save results
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if(SAVE_RESULTS == 1)
save(FILENAME_CH_HYDR, 'Hydro_1');
save(FILENAME_CH_HYDR_CONC, 'Hydro_2');
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Communications
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
delete(u);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Resume - Debug
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
LogicalStr = {'false', 'true'};
fprintf('Number of adquired Channels: %d \n',NCHANNELS);
fprintf('Number of adquired Points: %d \n',NUMPOINTS);
fprintf('Sample Rate (calculated): %d Hz\n',SAMPLE_RATE);
fprintf('Sample Rate x16 (calculated): %d Hz\n',SAMPLE_RATE*16);
fprintf('Save the results (.mat): %s \n',LogicalStr{SAVE_RESULTS + 1});

```

```
fprintf('Save the results (.wav): %s \n',LogicalStr{SAVE_WAV + 1});
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%Normalize each Channel - Concatenate  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% MEAN_CHANNELS = mean(abs(Hydro_1));  
% HYDRO_NORM = Hydro_1./MEAN_CHANNELS;  
% %DEBUG_MEAN_CHANNEL = mean(abs(HYDRO_NORM));  
%  
% %Concatenate on the same matrix  
% tmp = HYDRO_NORM(1,:);  
% for(i=2:NUMPOINTS)  
% tmp=[tmp HYDRO_NORM(i,:)];  
% end  
  
% tmp = tmp/max(abs(tmp));  
% audiowrite(FILENAME_CH_ALL_NORM,double(tmp),SAMPLE_RATE*NCHANNELS);  
%  
%  
% figure()  
% plot(HYDRO_NORM)
```

#### Displacement\_hydro.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%Displacement_hydro.m  
%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt  
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt  
%André Dias- andre.rodrigues.dias@marinha.pt  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [timedifference]=timedifference(A,B)  
  
%Size of the vector  
%Vector size A = B  
N=length(A);  
  
%Obtain correlation between vectors  
x=xcorr(A,B);  
  
%Obtain the maximum  
[m,i]=max(x);  
  
%Displacement of the maximum  
%Time interval between the hydrohpne sound arrival  
timedifference = i-N;  
  
end
```

#### Angle\_calculation.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt
%André Dias - andre.rodrigues.dias@marinha.pt
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function [angle]=Calc_Angle(FS, C, timedifference, S1, S2, d)
```

```

%FS - Sampling frequency (Hz)
%C - Sound water velocity (m/s)
%timedifference - Time difference between the arrival of the sound (n times
FS)
%S1 - Hydrohpne number 1
%S1 - Hydrohpne number 2
%d - Physical distance between hydrophones (meters)

```

```

%Returns the angle in degrees
angle=acosd((timedifference*1/(FS*15)*C)/((S2-S1)*d));

```

```
end
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt
%André Dias - andre.rodrigues.dias@marinha.pt
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function [angle]=Calc_Angle(FS, C, timedifference, S1, S2, d)
```

```

%FS - Sampling frequency (Hz)
%C - Sound water velocity (m/s)
%timedifference - Time difference between the arrival of the sound (n times
FS)
%S1 - Hydrohpne number 1
%S1 - Hydrohpne number 2
%d - Physical distance between hydrophones (meters)

```

```

%Returns the angle in degrees
angle=acosd((timedifference*1/(FS*15)*C)/((S2-S1)*d));

```

```
end
```

## Apêndice B- Código MatLab Classificação

### Extract\_spectra.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Classification of noises
%Extract_spectra.m
%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt
%André Dias - andre.rodrigues.dias@marinha.pt
%Last update - 15/08/2023
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function data=Extract_spectra(filename,class);
% function data=Extract_spectra(filename)
%
% Extracts a 128 feature vector with the low frequency spectra of the first
% 3 seconds of the wave file given

[Y, FS] = audioread(filename);

% see how many datapoints I can get from this file:
n=floor((length(Y)-100)/(3*FS));
data=[];

for x=1:n-1
    %The file is saved with a sampling frequency of 52k
    y1= Y((x-1)*3*FS+1:x*3*FS); %jump over the first 100 samples and keep 3
s of sound
    s1=zeros(128,1);
    for i=1:2
        yt=y1((i-1)*2048+1:i*2048);
        s=abs(fft((yt-mean(yt))));
        s1=s1+s(1:128);
    end
    s1=s1/2;
    s1=[s1;class];
    data=[data;s1'];
end;
```

### Save\_spectra.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Classification of noises
%Save_spectra.m
%Nuno Pessanha Santos - santos.naamp@academiamilitar.pt
%Victor Lobo - vlobo@novaims.unl.pt
%André Dias - andre.rodrigues.dias@marinha.pt
%Last update - 15/08/2023
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
d1=Extract_spectra("DATA0049.WAV",1);
```

```
d2=Extract_spectra("DATA0050.WAV",2);  
d3=Extract_spectra("DATA0038.WAV",3);  
save("dadosclassi.csv", "d1", "d2", "d3", "-ascii");
```

# Implementation of a Passive Acoustic Barrier for Surveillance

André Rodrigues Dias\*, Nuno Pessanha Santos\*<sup>†</sup>, Victor Lobo\*<sup>‡</sup>

\*Portuguese Naval Academy Research Center (CINAV), Portuguese Naval Academy (Escola Naval), Almada, Portugal  
E-mail: andre.rodrigues.dias@marinha.pt

<sup>†</sup>Portuguese Military Academy Research Center (CINAMIL), Portuguese Military Academy (Academia Militar), Lisbon, Portugal  
E-mail: santos.naamp@academiamilitar.pt

<sup>‡</sup>NOVA Information Management School (Nova IMS), Universidade Nova de Lisboa, Portugal  
E-mail: vlobo@novaims.unl.pt

**Abstract**—With the end of the cold war, the interest in underwater warfare decreased dramatically. However, recent developments have brought underwater warfare back to center stage. Anti-submarine warfare is always one of the major concerns of a navy since it is difficult to detect an enemy submarine in the vast ocean. Conjugating the recent developments in unmanned vehicles and active and passive acoustic surveillance, we can perform better data fusion and increase our knowledge about the events occurring in our waters. The processed data originating from acoustic surveillance can potentially be an essential source of naval intelligence. An acoustic barrier can perform this detection with success. Still, these systems require highly qualified personnel to operate, present a costly infrastructure, and are hard to implement and maintain. Data fusion from multiple sources, and even from low-cost sensors with noisy measures, are a promising solution, especially if resource optimization is a priority. The implementation described in this paper is intended to be proof of concept of a low-cost implementation in shallow waters that can be easily expanded and evolved to different scenarios. The preliminary results obtained confirm that this is a viable solution.

**Index Terms**—Surveillance, Acoustics, Acoustic applications, Multiple signal classification, Signal processing algorithms.

## I. INTRODUCTION

Portugal has a privileged maritime geostrategic position [1] and has jurisdiction over one of the largest maritime areas in Europe [2]. It is essential to guarantee state authority and security over this space by performing constant maritime surveillance and supervision. To accomplish this, all the obtained surveillance data must be integrated, processed, and disseminated, guaranteeing we get knowledge from data mining. The probability of surveillance success increases when we gather data from multiple sources and perform data fusion. The most common target data source in the maritime domain is radar (electromagnetic waves) [3]. Still, this type of wave can be easily affected, e.g., by jamming, the meteorological conditions, or the earth's curvature having a very limited range when used underwater [4].

Nowadays, most countries' coastal surveillance is based on a Vessel Traffic System (VTS) [5] with radar and electro-optical capabilities that can also receive Automatic Identification System (AIS) data [6]. In maritime areas with high

ship traffic density, such as, e.g. traffic separation schemes or ports, with the existing surveillance systems, it is possible that some maritime activity still escapes national surveillance and control. Small vessels or submarines are clear examples of naval platforms that can easily escape surveillance, and that's a problem that must be addressed, especially with the increase of enemy submarine activity due to the armed conflicts in Eastern Europe [7].

Acoustic surveillance can overcome the existing limitations since it can help to detect and identify the origin of the sounds propagating in the maritime environment and perform multiple tasks, such as classifying the sound source [8]–[10]. If we can classify the sound source, we can identify if we are dealing with undesired ships or submarines. Sound Navigation and Ranging (SONAR) can be used to perform acoustic surveillance and can be passive or active [11], according to the desired application. An active SONAR emits an acoustic signal into the water. It considers the sound propagation time of the reflected waves in its processing to estimate the distance and position to a specific target [11]. To increase the detection probability of success, it is essential to know the environment where the detection will likely occur.

In the military domain, an active SONAR usually presents a disadvantage since it can reveal the ship's location to a potential enemy. On the other hand, a passive SONAR cannot estimate the distance to a target. However, a network of passive sonars (passive acoustic barrier) can classify and triangulate the origin of a sound source bringing an essential advantage during military operations [11], [12].

A passive acoustic barrier can be implemented using multiple SONAR types arranged in different configurations. To achieve better area surveillance, they can even be implemented in moving platforms such as unmanned vehicles [12]–[15], which can gather acoustic data without needing local human operation. A standard towed array [16], [17] has a series of hydrophones that, when used away from a noise-generating source, can achieve a high probability of acoustic detection. Since it can be used at different depths, we can optimize its performance by considering the ocean's acoustic characteristics to achieve better detection rates. An acoustic barrier can

be constructed using multiple towed arrays implemented in a moving platform or fixed position and can be particularly effective if positioned in a chokepoint [18].

Presently, most implemented acoustic barriers are based on fixed seafloor passive SONAR systems [19] connected by cable to a shore station or towed arrays [16], [17]. One of the most known examples of a fixed seafloor passive SONAR system is the Sound Surveillance System (SOSUS) [19], developed by the United States of America (USA) Navy and installed in the Atlantic and Pacific oceans during the cold war to detect and track Soviet submarines. After the end of the cold war, the USA began developing the Surveillance Towed Array Sensor System (SURTASS) [20] that uses towed array hydrophones to perform surveillance, having as the main advantage its mobility. By performing the fusion of the data gathered from several ships (several data sources), it is possible to obtain a better knowledge of the surrounding environment.

Fig. 1. Field tests illustration 1 - Robotics Exercise 2022.



Regarding Portugal, the infrastructure to implement a national coastal surveillance system (acoustic barrier) does not yet exist, and its implementation is considered expensive. The acoustic stations that constitute an acoustic barrier should be constructed strategically, such as in the vicinity of ports or near submarine cables [21]. The main objective of this article is to describe a low-cost implementation in shallow waters that, if appropriately scaled, can be used to implement a national acoustic barrier. The initial field and processing tests (Figure 1) show promising results, but we have much room for improvement to increase the system's capabilities and applicability. The lack of a national barrier for acoustic surveillance is a gap that must be addressed as soon as possible and gives much more relevance to this study.

This article is organized as follows. Section II characterizes the used equipment and describes its utilization. Section III describes the performed initial field tests. Section IV illustrates the executed acoustic processing. Finally, Section V presents the conclusions and provides directions for further research work.

## II. SYSTEM DESCRIPTION

We aim to develop a simple low-cost implementation that can be used successfully in shallow waters. The initial tests were conducted using simple equipment available at our lab, characterized by the following:

- **KraitArray** - A towed array designed and built by the SEA company [22] for small ships, shown in Figure 2. The used version was an early experimental model with a length of eighteen meters, sixteen hydrophones, and two non-acoustic sensors to provide water temperature, depth, and the array course (Figure 3 and Figure 4). During its operations, we have also used a tow cable to push it away from the ship's sound source and be able to increase the signal-to-noise ratio. Each hydrophone is digitalized with 24-bit levels, and all the data is transferred to a computer in real-time using a simple ethernet connection;
- **DigitalHyd SR-1** - A compact autonomous acoustic recorder containing one hydrophone, built by MarSensing [23], shown in Figure 5, that we use as a backup system to the KraitArray and to confirm ground truth identification of the sound sources;
- **DolphinEar** - A small commercial hydrophone developed for whale watching that is used to monitor in real-time what is being acquired, shown in Figure 6;
- **Conductivity, Temperature, and Depth (CTD) sensor** - This sensor is used to infer the sound propagation profile, measuring the water conductivity and temperature according to the depth, shown in Figure 7;
- **Underwater loudspeaker** - Used to generate underwater acoustic data (sound source) for detection and tracking, shown in Figure 8.

Fig. 2. KraitArray.



All this equipment was previously tested in the lab to ensure its functioning and that the acquired data was accurate enough to be viable for data fusion. Apart from the lab, testing this

Fig. 3. KraitArray - Laboratory experimental tests I.



Fig. 4. KraitArray - Laboratory experimental tests II.



Fig. 5. DigitalHyd SR-1.



Fig. 6. DolphinEar.



equipment in a real field implementation was essential, as described in the next section.

### III. FIELD TESTS

The initial field tests occurred during the annual Robotics Exercise (REX) organized by the Portuguese Navy Research Center (CINAV) in September 2022, back to back with NATO's Robotic Experimentation and Prototyping Augmented by Maritime Unmanned Systems REP(MUS) '23 exercise. This exercise provided the ideal opportunity to study the best methods and alternatives for implementing a passive acoustic barrier for surveillance.

We placed the underwater loudspeaker (Figure 8) at a fixed position and collected acoustic data at 100 (Test A), 200 (Test B), 400 (Test C), and 800 yards (Test D) from

the sound source, as described in Figure 9. A rigid-hull inflatable boat was then used to tow the array and acquire data using a simple portable computer, as shown in Figure 10 and Figure 11. Shortly, and as one of the objectives of our future developments, we expect to acquire data using a towed array connected to a completely autonomous platform allowing remote system operation.

For the initial tests, we used two simple sounds generated from a wave file located on a portable computer connected to the underwater loudspeaker. We have used a pure continuous sound tone of 220  $Hz$  and a pulsed chirp varying from 220—880  $Hz$  with two seconds of duration. This paper describes the results using these simple sounds that humans can easily recognize in audio files. Still, we have several recordings of ships that we used to simulate real contacts and to test our pattern-matching and recognition systems over this acoustic sensing system.

The CTD was operated daily to obtain the true speed of sound in water, getting an average value of 1523  $m/s$  (Figure 12). This value will be used in the next section during the data processing. During the exercise, we have also taken the opportunity to collect other external sound sources (targets of opportunity) to create a simple database of non-classified acoustic data sources for posterior processing.



Fig. 7. Seacast.

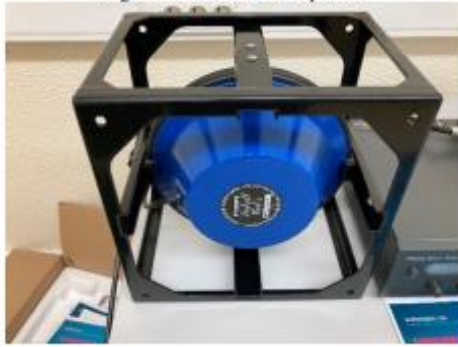


Fig. 8. Underwater loudspeaker.

#### IV. DATA PROCESSING

After collecting data from the field tests, its processing was performed<sup>1</sup>. The exercise occurred in very shallow waters with an average depth of 6 meters and a maximum depth of 20 meters, which is the expected depth when operating very near the Portuguese coast and at harbor entrances and bays. We have considered a mean sound velocity of 1523  $m/s$ , as described in Figure 12. Given the very high rate of change in sound speed, and considering that that variation is linear, we obtained the gradient using minimum squares regression. With a linear decrease in speed, the sound path is approximately circular (and facing downwards), and the expected sound radius for the obtained sound velocity profile is approximately  $R \cong 1523/6.06 \cong 251.32 m$ . The sound will then bounce up and down between the muddy bottom and the surface.

To obtain the Direction of Arrival (DOA) of the acoustic signals and compare it with the ground-truth data (Figure 13) obtained by Global Positioning System (GPS), we have identified the received signal and computed the correlation between signals received at different hydrophones of the array. Since we assume that the sound behaves as a planar wave, the correlation gives us the displacement in the time needed for the wave to reach a different hydrophone. Since we have sixteen hydrophones, we have calculated this correlation using multiple hydrophones to validate the results' accuracy. Due to the used towed array's physical characteristics, each channel (hydrophone) was separated by a distance of 0.45 meters. After obtaining the needed parameters, the DOA angle can be easily calculated as follows:

<sup>1</sup>The under-development MATLAB code is publicly available at [https://github.com/Pessanha24/acoustic\\_processing.git](https://github.com/Pessanha24/acoustic_processing.git).

Fig. 9. Tests performed during the exercise to collect acoustic data: Test A - 100 yards, Test B - 200 yards, Test C - 400 yards, and Test D - 800 yards.



Fig. 10. Field tests illustration II - Robotics Exercise 2022.



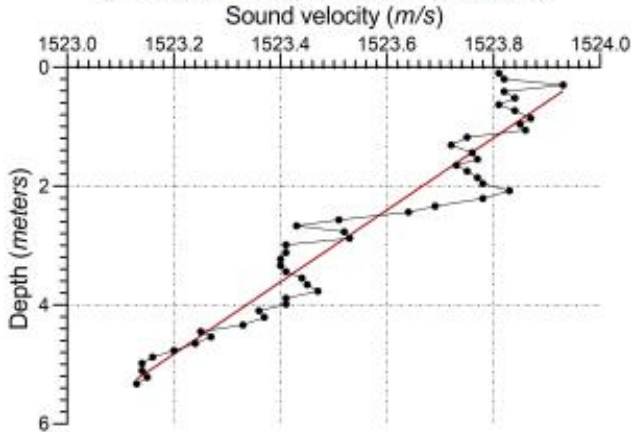
$$\theta = \arccos\left(\frac{\frac{n_d}{f_s} \cdot c}{d \cdot (s_2 - s_1)}\right) \quad (1)$$

where  $\theta$  is the DOA angle,  $n_d$  is the bin displacement interval between the two signals obtained using the correlation operation,  $c$  is the sound velocity in  $m/s$ ,  $f_s$  is the sampling frequency in  $Hz$ ,  $d$  is the physical distance between two consecutive hydrophones (assuming all hydrophones equally spaced), and  $s_1$  and  $s_2$  are the chosen hydrophone positions. The accuracy of calculating the parameters is essential since a small error can result in substantial final variations. The exercise area had lots of environmental noise, which initially led to erroneous results, making us doubt the system's practicality. However, by hearing the sounds, we verified what should have been obvious from the beginning: the angle of arrival only made sense when the chirp sound was clearly stronger than

Fig. 11. Field tests illustration III - Robotics Exercise 2022.



Fig. 12. Sound velocity profile - Obtained field results.



the background. Due to this, for our preliminary tests, we selected a 1-second interval during the reception of the chirp signal. We repeated the measurements at several locations. While the results were acceptable at various locations, the best results were naturally obtained at a nearly perpendicular angle between the direction of the towed array and the sound path. To have a reasonable baseline, we tested several different hydrophone configurations. We concluded that the best results were obtained using two hydrophones spaced by four positions in the middle of the towed array. However, to confirm the results' reliability, we actually computed the time correlation of all pairs of hydrophones four positions apart, *i.e.*, 1 and 4, 2 and 5, *etc.* For the 12 possible pairs, the maximum correlation occurred at a 1 bin displacement, except for two pairs with 0 and 4 displacement. Ignoring these two outliers, the computed angle of arrival is  $85^\circ$ , which is exactly the angle obtained using the GPS positions of Figure 13.

#### V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Nowadays, Portugal does not have an implemented passive acoustic barrier for surveillance. Still, the tests described in

Fig. 13. Example of results evaluation using ground-truth data.



this paper show that such a system can be easily implemented using low-cost sensors solving a real problem. This research can directly contribute to increasing the surveillance levels around the coast and improving safety and security in the maritime domain. It is essential to have an early warning of possible threats allowing more time to react and enhancing the possibility of making the right decision. With this knowledge, we can also optimize surveillance resources since we can focus the efforts on specific areas of interest.

The initial tests showed that a simple, low-cost system is a viable solution in very shallow waters since we can easily detect and even distinguish the direction of the sound source using a pair of hydrophones. By georeferencing the obtained data with the performed calculations, we can conclude that the direction of the sound source (angle) can be detected with low error.

Future work will focus on using more hydrophones to perform better data fusion and implement this system using unmanned vehicles to implement a high-performance passive acoustic barrier for surveillance with accessible costs.

#### REFERENCES

- [1] M. R. Adhitama, "Geopolitics of portugal in atlantic sea," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, no. 6, pp. 48–52, 2019.
- [2] S. Blanco, "The mar-portugal plan: How portugal's action plan to transition into a maritime economy may prove challenging within the current international regulatory framework for deep sea mining," *J. Int'l Bus. & L.*, vol. 21, p. 68, 2021.
- [3] H. J. Roarty, M. Smith, S. M. Glenn, D. E. Barrick, C. Whelan, E. Page, H. Statscewich, and T. Weingartner, "Expanding maritime domain awareness capabilities in the arctic: High frequency radar vessel-tracking," in *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*. IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [4] D. Park, K. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Development of underwater short-range sensor using electromagnetic wave attenuation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 318–325, 2015.
- [5] T. Hughes, "Vessel traffic services (vts): Are we ready for the new millennium?" *The Journal of Navigation*, vol. 51, no. 3, pp. 404–420, 1998.
- [6] M. Robards, G. Silber, J. Adams, J. Arroyo, D. Lorenzini, K. Schwehr, and J. Amos, "Conservation science and policy applications of the marine vessel automatic identification system (ais)—a review," *Bulletin of Marine Science*, vol. 92, no. 1, pp. 75–103, 2016.
- [7] T. Oder, "The dimensions of russian sea denial in the baltic sea," *Center for International Maritime Security*, vol. 1, 2018.

- [8] C. Zhu, H. Garcia, A. Kaplan, M. Schinault, N. O. Handegard, O. R. Godø, W. Huang, and P. Ratilal, "Detection, localization and classification of multiple mechanized ocean vessels over continental-shelf scale regions with passive ocean acoustic waveguide remote sensing," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1699, 2018.
- [9] V. Lobo and F. Moura-Pires, "Ship noise classification using kohonen networks," *Proc. of the Engineering Applications of Neural Networks-EANN*, vol. 95, 1995.
- [10] V. Lobo, N. Bandeira, and F. Moura-Pires, "Ship recognition using distributed self organizing maps," in *Engineering Benefits from Neural Networks. Proceedings of the International Conference EANN'98*, 1998, pp. 326–9.
- [11] J.-P. Marage and Y. Mori, *Sonar and underwater acoustics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [12] E. Rizzuto and V. Ruggiero, "Remote passive acoustic barrier with maritime unmanned systems: Preliminary tests during repmus-21," in *Technology and Science for the Ships of the Future: Proceedings of NAV 2022: 20th International Conference on Ship & Maritime Research*, vol. 6. IOS Press, 2022, p. 287.
- [13] A. Sedunov, H. Salloum, A. Sutin, N. Sedunov, and S. Tsyuryupa, "Uav passive acoustic detection," in *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [14] S. Zheng, X. Cao, F. Tong, G. Zhang, and Y. Dong, "Performance evaluation of acoustic network for underwater autonomous vehicle in confined spaces," in *2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [15] V. E. Premus, P. A. Abbot, V. Kmelnitsky, C. J. Gedney, and T. A. Abbot, "A wave glider-based, towed hydrophone array system for autonomous, real-time, passive acoustic marine mammal monitoring," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 152, no. 3, pp. 1814–1828, 2022.
- [16] F. Bruno, M. Janneh, A. Gunda, R. Kyselica, P. Stajanca, S. Werzinger, G. Gruca, N. Rijnveld, G. Persiano, A. Cutolo *et al.*, "Fiber optic hydrophones for towed array applications," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 160, p. 107269, 2023.
- [17] S. G. Lemon, "Towed-array history, 1917-2003," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 365–373, 2004.
- [18] C. Emmerson and P. Stevens, "Maritime choke points and the global energy system," *Charting a Way Forward, Chatham House Briefing Paper, London*, vol. 4, 2012.
- [19] G. E. Weir and U. Center, "The american sound surveillance system: using the ocean to hunt soviet submarines, 1950–1961," *International Journal of Naval History*, vol. 5, no. 2, p. 20p, 2006.
- [20] R. F. Henrick, "Surtass twinline," *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST*, vol. 34, no. 2, pp. 179–193, 2018.
- [21] J. Marreiros, "Vigilância acústica dos espaços marítimos sob soberania ou jurisdição nacional," 2018.
- [22] S. A. C. P. Company, "Independent systems engineering & software company," 2023. [Online]. Available: <https://www.sea.co.uk/>
- [23] M. Lda., "Tecnologias marinhas e acústica submarina," 2023. [Online]. Available: <https://www.marsensing.com/>

## Apêndice D- Gráficos obtidos da experimentação da tecnologia DAS em ambiente controlado

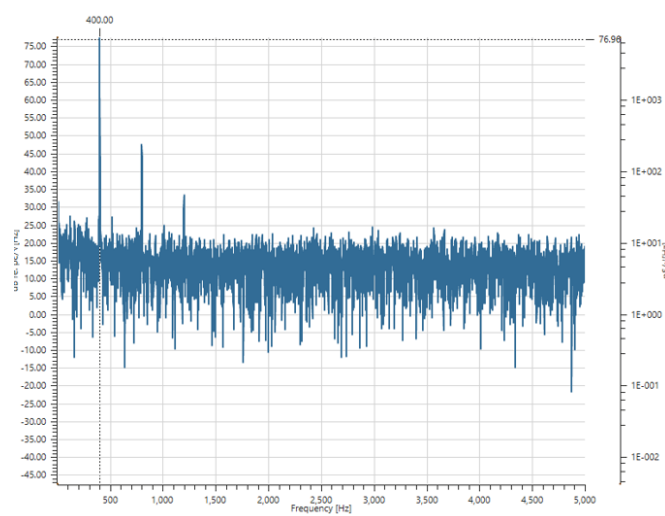


Figura 52-Tom puro contínuo 400Hz

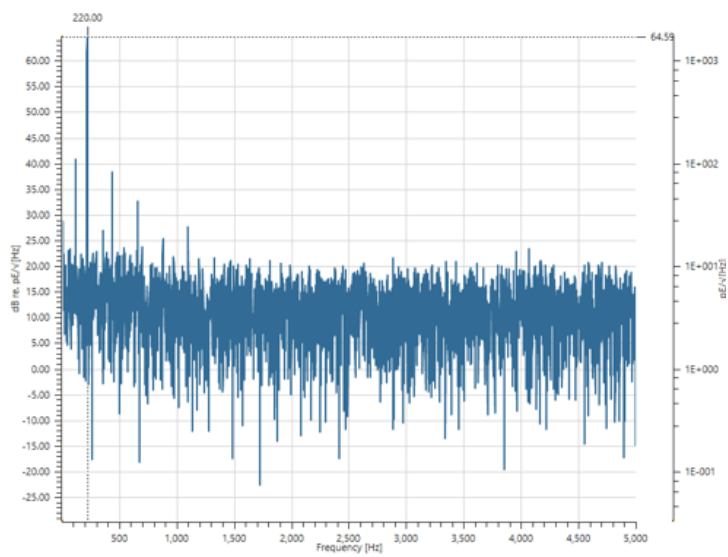


Figure 53-Tom puro contínuo 220 Hz

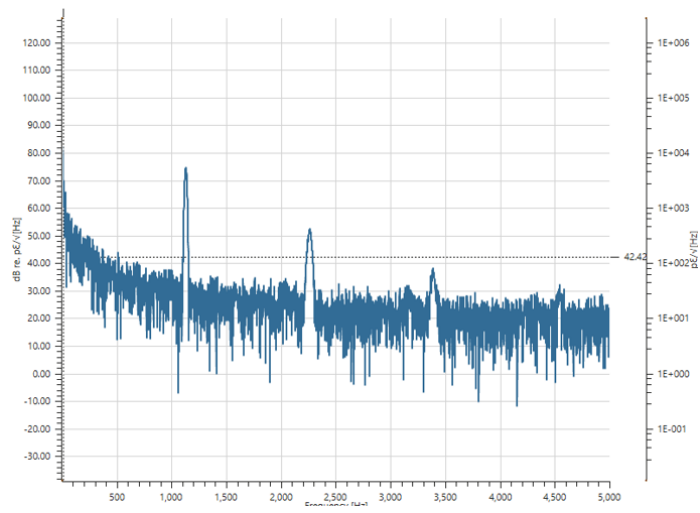


Figura 54-Chirp



## Apêndice E- Planeamento REX 22

### **Robotics Exercise (REX) - 2022** **Acústica Submarina**

#### Material a levar:

1. *Krait Array* (2 *PELI cases*);
2. Duas (2) baterias para alimentação elétrica do *array*;
3. *DolphinEar* (hidrofone pequeno para poder monitorizar o áudio em tempo real);
4. *DigitalHyd SR-1* + Cabo de amarração;
5. Sistema de Som (Amplificador + Projetor);
6. *Conductivity, Temperature and Depth* (CTD);
7. Computador *Dell "Guerreiros da acústica"* – Embarcação – Aquisição de dados do *Krait Array*. Tem que tem o *software WireShark* e do *Krait Array* (Empresa *Sea - Systems Engineering & Assessment Ltd*);
8. Computador "Latitude" – Terra – Ligado ao sistema de som;
9. Cabos para baixar o projetor e fazer o reboque do *DigitalHyd SR-1* e *Krait Array* (material existente no "balde de cabos de acústica");
10. - Extensões elétricas, carregadores para os computadores e baterias.

#### Zona de operação



Figura 1 – Zona de operação, incluindo as fiadas previstas.

#### Objectivo

Os testes a desenvolver servem para testar a operação do *Krait Array*, verificando se é possível captar adequadamente o som produzido, em águas muito pouco profundas. Adicionalmente vai-se testar pela primeira vez na água o projetor de som, e o resultado de rebocar um *DigitalHyd SR-1*.

### Descrição geral:

1. O *Krait Array* estará estendido a ré da embarcação do tipo semi-rígida da Célula de Experimentação Operacional de Veículos Não Tripulados (CEOV), ou bote se não houver embarcação disponível;
2. A velocidade de reboque (quando em movimento) deverá ser de 3 nós. A posição da embarcação deverá ser controlada pela *Ground Control Station (GCS)*, que usa GPS. Caso falhe, será utilizado em alternativa um *smartphone* para registar as posições;
3. A semirígida seguirá as fiadas representadas na Figura 1, sendo que todas começam 500jj antes da ponta do cais, e terminam 1000jj depois desse ponto (tendo assim um comprimento total de 1500jj). O rumo adotado deve ser 323. As fiadas devem ser feitas a 100jj (A), 200jj (B), 400jj (C), 800jj (D).
4. Para conseguir poupar tempo de execução vai-se fazer um *zigzag* pelas 4 fileiras, começando na primeira de Sul-Norte, depois a segunda de Norte-Sul, etc;
5. **No início de cada fiada, o operador tem que colocar o software *WireShark* a gravar, e no fim parar e guardar o ficheiro com os pacotes.** Cada ficheiro deve ter um nome no formato LxxSNxx (letra L= fiada, e nº de série, N = nº do som). Por exemplo A01SA01, significa primeira corrida da fiada "A" (100jj), primeiro som "A" (sinal contínuo 220Hz), enquanto C03SC02 é 3ª fiada "C" (300jj), com o som "C" (navio). Estimamos que cada fiada demore 15 minutos, com uma hora e meia para cada *zigzag*;
6. O *DigitalHyd SR-1* deve ser ligado no início do dia, e fica a guardar até ao fim das operações;
7. O CTD será usado no início e no fim, apenas para saber a verdadeira velocidade do som na água (o perfil em profundidade será quase irrelevante);
8. Vão ser usados 3 sons diferentes, gerados a partir de ficheiros WAV do computador "latitude" em terra, que manda o sinal de áudio para sistema de som (ajustar os filtros -sem filtros - e regular o som);
9. Os sinais a transmitir (em repetição) são:
  - a. Tom puro contínuo de 220 Hz (220Hz.wav);
  - b. *Chirp* pulsado de 220Hz a 880Hz (2 segundos) seguido de 3 segundos de silêncio (chirp.wav);
  - c. Navio não especificado (navio.wav).

### Programa resumido:

1. O programa para os 2 dias será o seguinte:
  - a. Dia 1:
    - i. *Zigzag* por todas as fiadas (Figura 1), com o som de 220 Hz;
    - ii. *Zigzag* por todas as fiadas (Figura 1), com o som *Chirp*.
  - b. Dia 2:
    - i. *Zigzag* por todas as fiadas (Figura 1), com o som do navio;
    - ii. *Zigzag* por todas as fiadas (Figura 1), com o som de 220 Hz. Este *zigzag*, deverá ser feito de fora para dentro e com as direções contrárias ao efetuado no primeiro dia.

### Ideias/tarefas pendentes:

1. Utilização de outros sons como e.g. *chirp* similar a um sonar ativo, vários tipos de navio, animais, ruído branco, etc.;
2. Efetuar deteção, localização e classificação dos sons gerados;
3. Empregar os *DigitalHyd TP-1* presos a uma régua (espaçamento fixo);
4. Prender os *DigitalHyd SR-1* a uma bóia durante todo o exercício.

## Apêndice F- Relatório REX 22

### Relatório de Missão

NAVAL-REX 2022

#### 1. Missão

Em 2019 foi cedido à Marinha Portuguesa por empréstimo da empresa britânica Systems Engineering & Assessment Ltd (SEA) um sonar passivo rebocado experimental, sobre o qual se desconhecia o seu estado de funcionamento.

Na sequência de um pedido do Comando Naval (através do CEOV), para aferir a operacionalidade do “towed array”, assim comumente designado, foram realizados testes, inseridos no exercício REX-22.

O Robotics Exercise promovido pela Marinha Portuguesa contou com a participação da Escola Naval , através do seu Centro de Investigação Naval, durante os dias 06/09/2022-08/09/2022 nas instalações do Ponto de Apoio Naval de Tróia, onde atualmente se encontra o Centro de Experimentação Operacional da Marinha e a zona livre tecnológica.

Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos para o exercício REX-22:

6. Aferir o funcionamento do “Towed Array”.
7. Recolher dados acústicos seguindo um planeamento de fiadas e posteriormente, efetuar o seu processamento de sinal.
8. Realizar testes com o novo projetor de som adquirido em 2019 sob a égide do CINAV.
9. Efetuar rotinas com diversos equipamentos tais como o hidrofone autónomo SR1, os dois hidrofones cabelados TP1 e a sonda CTD.
10. Testes a um sistema de controlo remoto de um lancha Semirígida.

## 2. Preparação do Exercício

O exercício REX-22 requereu uma vasta preparação nas semanas que o antecederam. A cargo da sua preparação estiveram empenhados o Professor Catedrático Vítor Lobo, o Professor Auxiliar Mário Gatta, o 1TEN EN-AEL Pessanha Santos e o CAD M Rodrigues Dias. Estava previsto o Professor Auxiliar Vitor Viegas ter preparado os dois hidrofones TP1 mas tal não se verificou.

A preparação do exercício revelou ser bastante desafiante uma vez que o “towed array” era uma versão experimental, o que consequentemente apresentava algumas imprecisões no seu software, que foram colmatadas com várias reuniões com o fabricante do equipamento.

Além disso, alguns elementos por motivos de férias não estiveram presentes na sua preparação e nos três dias de exercício, em que o primeiro foi dedicado à ambientação. Também não puderam comparecer devido a defesas de dissertações de mestrado e da reunião do Conselho Científico da Escola Naval. Nos dias do exercício podemos contar também com o auxílio do Engenheiro Friedrich Zabel da empresa MarSensing Lda., sediada na universidade do algarve que contribui-o com os seus conhecimentos de desenvolvimento de software e dos equipamentos que estávamos a operar, uma vez que o hidrofone autónomo SR1 foi desenhado por si e pela sua equipa, tendo resolvido alguns problemas a nível do software do “towed array”.

## 3. Material que disponhamos

Para este exercício disponhamos do seguinte material:

1. Krait Array (2 PELI cases);
2. Duas (2) baterias para alimentação elétrica do array;
3. DolphinEar (hidrofone pequeno para poder monitorizar o áudio em tempo real);
4. DigitalHyd SR-1 + Cabo de amarração;
5. Sistema de Som (Amplificador + Projetor);
6. Conductivity, Temperature and Depth (CTD);
7. Computador Dell “Guerreiros da acústica” – Embarcação – Aquisição de dados do Krait Array.

Tem que ter o software WireShark e do Krait Array (Empresa Sea - Systems Engineering & Assessment Ltd);

8. Computador “Latitude” – Terra – Ligado ao sistema de som;
9. Cabos para baixar o projetor e fazer o reboque do DigitalHyd SR-1 e Krait Array (material existente no “balde de cabos de acústica”);
10. - Extensões elétricas, carregadores para os computadores e baterias.

O towed array utilizado trata-se do SEA KraitArray 18m Demo Array e foi cedido temporariamente pela empresa Sea - Systems Engineering & Assessment Ltd para experimentação. Este array tem um comprimento de 18m e nele integram 16 canais acústicos e 2 não acústicos que nos dão a sua atitude. O seu cabo de reboque tem um comprimento de 100m. Quanto mais comprido for cabo de reboque menos interferência teremos do ruído gerado pelo próprio, melhorando exponencialmente signal-to-noise ratio.

Este equipamento representa uma excelente oportunidade para operar um sonar passivo rebocado.

#### 4.Zona de operação



#### 5.Descrição pormenorizada do exercício

Os testes a desenvolver serviram para testar a operação do Krait Array, verificando que é possível captar adequadamente o som produzido, em águas muito pouco profundas, que depois será processado de modo a detetar e classificar a origem do som. Adicionalmente testou-se pela primeira vez na água o projetor de som, e o resultado de rebocar um DigitalHyd SR-1, permitindo assim explorar um vasto leque de equipamentos que poderão mais tarde ser a génese para a implementação de uma barreira acústica no porto de Lisboa.

Estava previsto o Krait Array ser rebocado através de uma embarcação do tipo semirrígida com propulsão a jato da Célula de Experimentação

Operacional de Veículos Não Tripulados (CEOV), o que não se verificou devido a implicações logísticas, tendo para o efeito sido utilizado uma embarcação do tipo “zebro 3”, tendo percorrido diversas fiadas, captando sons diferentes. A velocidade de reboque foi de aproximadamente 3 nós.

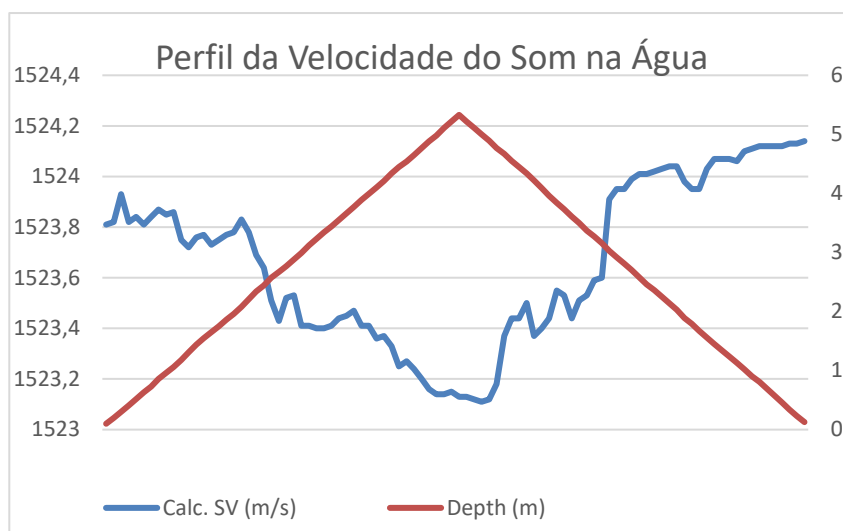
O planeamento das fiadas consistiu na semirrígida seguir as fiadas representadas na Figura 1, sendo que todas começaram 500jj antes da ponta do cais, e terminaram 1000jj depois desse ponto (tendo assim um comprimento total de 1500jj). O rumo adotado foi próximo de 323. As fiadas foram feitas a 100jj (A), 200jj (B), 400jj (C), 800jj (D). No entanto o planeamento não foi seguido à justa pois a bordo da embarcação não disponhamos de nenhum equipamento que nos desse a posição em relação ao cais.

Para registar a posição foi utilizado um Garmin GPS tracker, que posteriormente foi descarregado e, após processado, foi correlacionado com a hora das posições para mais tarde se fazer o processamento de sinal.

Para dinamizarmos o tempo disponível foi efetuado um ziguezague pelas 4 fileiras, começando na primeira de Sul-Norte, depois a segunda de Norte-Sul e assim sucessivamente.

No início de cada fiada, o operador teve que colocar o software WireShark a gravar, e no fim parar e guardar o ficheiro com os pacotes. Cada ficheiro tem um nome no formato LxxSNxx (letra L= fiada, e nº de série, N = nº do som). Por exemplo A01SA01, significa primeira corrida da fiada “A” (100jj), primeiro som “A” (sinal contínuo 220Hz), enquanto C03SC02 é 3ª fiada “C” (300jj), com o som “C” (navio).

O CTD foi operado diariamente para se obter a verdadeira velocidade do som na água, tendo sido obtido o seguinte valor médio, 1523m/s. Será este o valor que será utilizado na fase do processamento de sinal. O perfil em profundidade torna-se irrelevante para o efeito que se pretendeu e pelo facto de em tão pouca profundidade a velocidade do som ter pouca variação, como demonstrado na Figura .



O DigitalHyd SR-1 foi ligado no início do dia, acoplado ao cabo de reboque, permanecendo a gravar até ao fim das operações.

Foram usados 3 sons diferentes, gerados a partir de ficheiros WAV do computador "latitude" em terra, que manda o sinal de áudio para sistema de som. Os sinais transmitidos foram os seguintes:

- a. Tom puro contínuo de 220 Hz (220Hz.wav);
- b. Chirp pulsado de 220Hz a 880Hz (2 segundos) seguido de 3 segundos de silêncio (chirp.wav);
- c. Navio não especificado (navio.wav).

Durante o exercício foram também captados sons de alvos de oportunidade como alguns ferries que por terem AIS conseguiremos cruzar a sua posição e hora com os dados acústicos.

## 6. Lições aprendidas/ Aspetos a melhorar

Durante o decorrer do exercício foram identificados os seguintes aspetos a melhorar:

5. Os botes revelaram-se muito instáveis e inadequados para a configuração a bordo. Operar um computador no bote é um desafio muito grande pois o bote é pouco resistente a condições de mar adversas. Além disso, torna-se pequeno para os equipamentos todos. Sugere-se uma embarcação maior, com equipamentos de controlo de posição próprios.
6. A alimentação do Krait Array era fornecida por duas baterias de 12V ligadas em paralelo o que perfazia um total de 24V. O computador, que dispõe de bateria própria esgotou-se no último dia, originando o término do exercício mais cedo. Torna-se necessário instalar um transformador nas baterias de 12V para, também, alimentar o pc.ç
7. Seja arranjada uma solução para permitir o acesso ao pontão e à extremidade do cais durante operações de voo.
8. Sejam esclarecidas as condições para emissões acústicas na bacia do Sado.

Em suma, o exercício Naval-Rex permitiu confirmar o bom funcionamento do Towed Array e a sua capacidade de detectar vários contactos, reais e provocados pelo projector de som, bem como verificar a atitude do array durante o reboque. Foram recolhidos dados acústicos com o Towed Array em ambiente controlado, e pré-determinado de acordo com um plano, permitindo o seu posterior processamento com várias técnicas de processamento de sinal. Além disso, confirmou-se o bom funcionamento do projector de som, do hidrofone SR1, e do equipamento CTD, e recolha de dados para posterior análise.

## Apêndice G- Checklist Fibersense test

# Checklist Exercício Fibersense 2023 – Acústica Submarina

### Material a levar:

- Krait Array (2 peli cases)
- Duas (2) baterias 12V para alimentação do krait Array
- Dolphin Ear(hidrofone pequeno para poder monitorizar o áudio em tempo real)
- DigitalHyd SR-1 + Cabo de amarração;
- Sistema de Som (Amplificador + Projetor);
- Conductivity, Temperature and Depth (CTD);
- Computador Dell “Guerreiros da acústica” –Terra- Aquisição de dados do Krait Array;
- Computador “Latitude” – Terra – Ligado ao sistema de som;
- Cabos, boias, poitas para baixar o projetor e fazer o reboque\ fundear o DigitalHyd SR-1 e Krait Array (material existente no “balde de cabos de acústica”);
- Extensões Elétricas, carregadores para os computadores e baterias;
- Crocodilos para as baterias, máquina de soldar, solda;
- Fonte para alimentar o KraitArray e respetivos fios;
- Computador “RD01-computador pessoal Dias” que vai ter a correr o software AIS;
- Antena e Dongle AIS;
- Múltimetro;
- Outras ferramentas (alicate, canivete...)

### Guia de Operação Krait Array

1. Arrancar com o PC em Windows. No desktop estão as aplicações

- a. WireShark
- b. ACTS
- c. NAS Test
- d. LPA Test
- e. KDS sense

O IP da maquina que recebe deve ser 192.168.101.10

O array está em 192.168.101.1

2. Arrancar com o Wireshark (versão 3.6.6, com um add-on da SEA que faz a descodificação do pacote, que vem com o instalador).

- a. Tem botões para start/stop no wireshark

3. Ligar o array (Power-ON, a 24V)

- a. O array deve consumir 0.14 a 0.21A, e quando for configurado avança para 0.26A

4. Arrancar com o ACTS que faz a configuração do sistema.

- a. No botão em baixo do lado esquerdo, ligar para OPEN
- b. Ir ao tab "SCRIPT"
  - i. No \users\mario\Desktop\towedarray\scripts, está o ficheiro 18m\_Demo\_Startup\_2022\_Sept.lpa
  - ii. Correr RUN SCRIPT (botao meio escondido a meia altura do ecrã)
  - iii. Pode-se desligar o ACTS neste momento.

5. Para ver os dados:

- a. 1. Ligar o LPA\_TEST (para ver sensores acústicos)
  - i. No control panel, em acoustic data source, ligar o icon de rede (pode em alternativa receber de um ficheiro)
  - ii. No painel "Monitored CHannels", ir a cada linha e escolher o "Channel"
  - iii. Mais abaixo, pode-se alternar de tempo para frequência
  - iv. A escala é ajustável no painel de baixo. Por até 1000Hz
- b. Ligar o NAS Test para ver os não acusticos
- c. Arrancar com o matlab, e abrir o programa  
c:\users\mario\destop\towedarray\acoustic\_processing\_main\Krait\_array\_read.m

O array é constituído por um cabo de 18m com 16 hidrofones, 2 sensores não acústicos e por um cabo de reboque de 100m.

O ficheiro wireshark será gravado com a seguinte terminologia:

**Para os testes que incluem RHIB**

T1 (perpendicular)

T2(paralelo)

T3.1(oblíquo 50m) seguido do som Rhib como abaixo indicado

T3.2 (oblíquo 100m)

T3.3 (oblíquo 150m)

T4 (Intensidade sinal à distância)

Então, a primeira passagem da RHIB em perpendicular-t1 será gravada:

T1\_rhib\_1.pcapng

**As restantes gravações serão da seguinte forma:**

Numeradas por ordem sequencial do tipo de som

Exemplo.

Primeira gravação som CHIRP

1\_CHIRP.pcapng

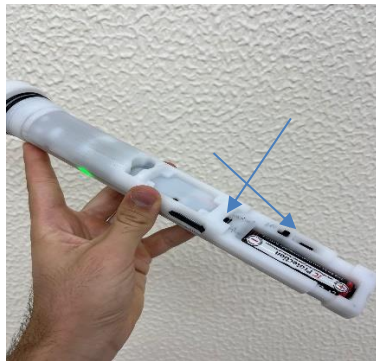
Segunda gravação com som CHIRP:

2\_CHIRP.pcapng

Primeira gravação som SENO:

1\_SENO.pcapng

### Guia de Operação SR-1

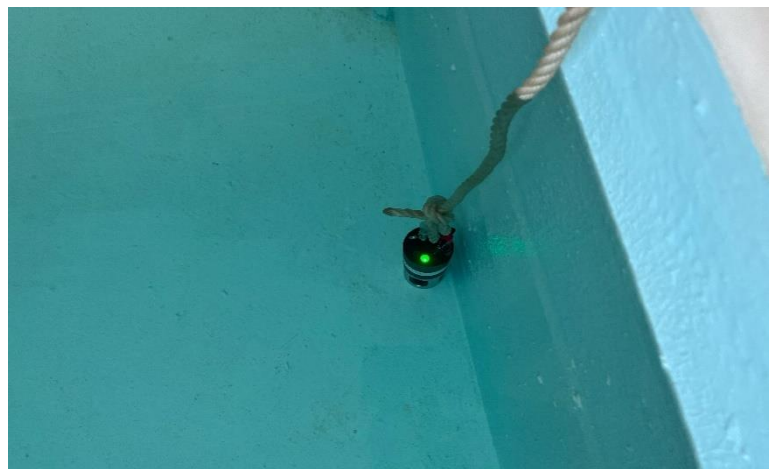
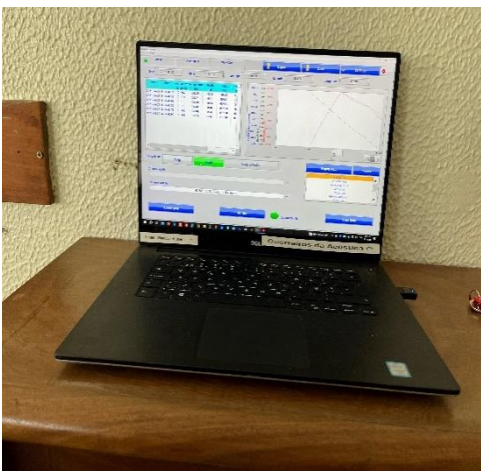


Para ligar e iniciar a gravação do SR-1 é necessário abrir a cápsula e ligar o equipamento ao pressionar os dois botões para on (meter para baixo como indicam o sentido das setas). Assegurar que ao fechar é colocado silicone e os o-rings estão a vedar bem.

O SR-1 cria ficheiros .wav com uma duração de 5 minutos cada,

com o nome DATA0001,DATA002...e assim sucessivamente. Confirmar que está sincronizado em tempo. (Ver manual de instruções). No fim do dia, as baterias são postas a carregar e os cartões de memória devem ser limpos e transferidos para o pc “Guerreiros da Acústica”-pasta SR-1.

### Guia de Operação CTD



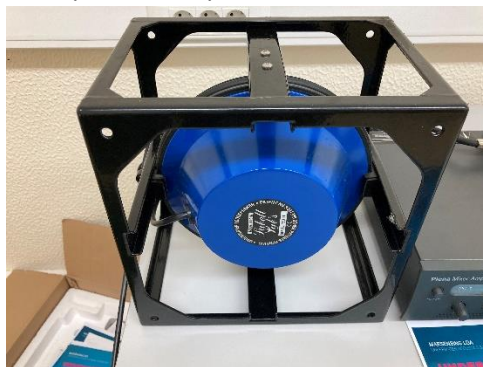
- a. Conductivity, Temperature and Depth (CTD)- Este equipamento liga automaticamente mal é colocado a antena. Verificar se tem vaselina e está bem apertado. Antes de ir para a água conectar com o pc no programa SeaCast. Se a luz estiver verde o equipamento está pronto para ir para água. Ele ficará com conexão interrompida enquanto estiver a gravar os dados, e uma vez fora de água irá gravar os dados na diretoria c:\users\mario\desktop\documents\Seacast\logs.csv

## Guia de operação Underwater Loudspeaker



O sistema de projecção de som subaquático é consituido por:

1. O projector (hidrofone)



2. O transformador de Isolamento



### 3. O amplificador



### 4. O cabo de ligação do transformador de isolamento ao projector

Cabo com aproximadamente 17 m, fixo de um lado ao projector, com uma ficha estanque com 3 fios, que liga ao transformador.



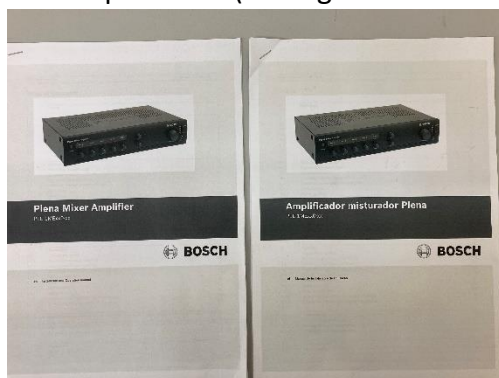
### 5. O cabo de ligação do transformador de isolamento ao amplificador

É um cabo muito curto, aparafusado a uma régua de terminais no amplificador (um dos fios ligado ao “comum”, e o outro à saída de 4ohms. Para ligar ao transformador tem um jack mono de 5mm.

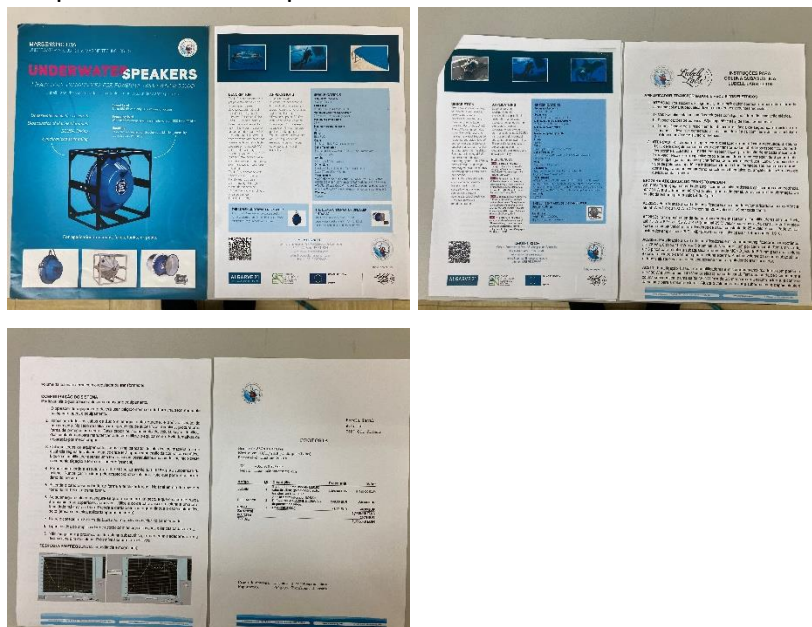


## 6. Documentação em papel

### a. Manual do Amplificador (em Inglês e em Português)



### b. Instruções para coluna subaquática LUBELL LABS LL916



Operação:

O amplificador tem que está ligado a 220V/50Hz, e pode receber através de fichas RCA sinais audio externos, em stereo (2 canais com Left/Right), ou sinais de 4 microfones, quer através de 2 jacks de 5mm e duas réguas de terminais. O cabo RCA não faz parte do equipamento, mas temos um cabo com RCA de um lado (com terminais BRANCO e AMARELO que devem ser ligados, e VERMELHO que pode ficar no ar) e um jack stereo de 3mm do outro lado. O Branco corresponde ao sinal "LEFT", e o Amarelo corresponde ao sinal "RIGHT".

O projector tem uma resposta de frequência de 200Hz-21KHz, uma potencia de 100dB re 1mPa, e uma profundidade máxima de 15m.

### **Como fazer playback Wireshark**

Na aplicação Colasoft Packet Player seleccionar um Adapter- eventualmente será o USB adapter. Para fazer o playback é necessário o pc criar uma ligação com outro pc. Ligar o cabo ethernet a outro pc. Escolher o Packet File que quer fazer playback. Press play.

A gravação irá decorrer como se estivesse a ser feito na vida real com o array a gravar.

### **AIS Catcher**

#1 Instalar os drivers apropriados através da aplicação ZADIG:

A - A aplicação pode ser obtida daqui:

<https://zadig.akeo.ie/>

<https://github.com/pbatard/libwidi/wiki/Zadig>

B - Correr a aplicação e instalar os drivers:

NOTA: instalar o driver WinUSB para "Bulk-In, Interface (Interface 0)" e para "Bulk-In, Interface (Interface 1)"

OBSERVAÇÃO: ShipXplorer é baseado no RTL-SDR:

<https://github.com/jvde-github/AIS-catcher>

<https://github.com/jvde-github/AIS-catcher/blob/main/README.md#Build-process>

#2 Instalar AIS-catcher:

A - Sacar a aplicação aqui:

<https://github.com/jvde-github/AIS-catcher/blob/main/README.md#Build-process>

NOTA: Sacar a versão mais recente SEM SDRPlay (x64 para os computadores modernos)

B - Descomprimir para uma pasta facilmente acessível (por exemplo no Desktop). Não é necessária qualquer instalação.

C - Testar instalação:

Com os drivers ZADIG já instalados, ligar o dongle AIS numa porta USB;

- Abrir uma janela de comando na pasta onde está a aplicação AIS-catcher;
- Executar o comando ".\AIS-catcher -l" e verificar se o dispositivo é encontrado;
- Em caso afirmativo, executar o comando ".\start.bat", ao fim de uns segundos deve ser possível começar a ver mensagens AIS a surgir;
- Para terminar a aplicação, basta fazer CTRL-C

#3 Visualização (AIS-catcher):

A - A aplicação AIS-catcher, quando está a correr usando o script start.bat, permite observar o panorama no browser, no endereço:

`http://127.0.0.1:8100/`

B - Se for pretendido usar outro endereço/porto, é necessário alterar o ficheiro start.bat para o(s) valor(es) pretendido(s). Em princípio isso não é necessário.

#4 Logging para um ficheiro (AIS Decoder):

A - Instalar AIS Decoder (sacar a versão mais recente aqui:

`https://arundaleais.github.io/docs/ais/ais_decoder.html`

[https://arundaleais.github.io/docs/ais/ais\\_decoder\\_v3\\_downloads.html](https://arundaleais.github.io/docs/ais/ais_decoder_v3_downloads.html)

## Guia de Operação GPS

O GPS Garmin map78s é carregado por duas baterias AA e tem entrada micro usb para exportar os tracks para pc.

Para guardar o trajeto atual:

Menu(clicar 2x)- Gestor de trajetos \_trajeto atual- guardar

Para aceder à bussola:

Page-Bússola-Menu(clicar1x)- Avistar e seguir

SÉRIE	PERÍODO (ALFA)	EVENTO	PARTICIPANTES	OCS	ÁREAS	OBJECTIVOS	OBSERVAÇÕES & LOGÍSTICA	VERSÃO
1000	10:00-12:00	TRÂNSITO EN-PANTROIA	EN & CEOV	EN	-	LEVAR O MATERIAL NECESSÁRIO PARA EFETUAR OS TESTES DE ACÚSTICA SUBMARINA – DIA 01	1. FERRY NÃO DISPONÍVEL	ORIGINAL
1002	13:00-1400	SYSCHECK	EN & CEOV	EN	CAIS	TESTE A TODOS OS SISTEMAS NO CAIS (SOFTWARE & HARDWARE) – AFERIR A OPERACIONALIDADE DOS SISTEMAS	1. PROFESSOR LOBO PODE NÃO ESTAR DISPONÍVEL NESTE DIA 2. APOIO DO SARGENTO ETS SILVESTRE	ORIGINAL
1004	14:00-14:15	COMMSCHECK	EN & CEOV	EN	PANTROIA	TESTE DE COMUNICAÇÕES – CAIS & EMBARCAÇÃO	NIL	ORIGINAL
1004	14:15-1545	ZIGUEZAGUE EM TODAS AS FIADAS USANDO O SOM 220 HZ	EN & CEOV	EN	PANTROIA	TESTE DE ACÚSTICA SUBMARINA I – DIA 01	1. FIADAS DE 1500 JJ & 3 KNTS 2. RUMOS: 323 &143	ORIGINAL
1006	1545-1730	ZIGUEZAGUE EM TODAS AS FIADAS USANDO O SOM CHIRP	EN & CEOV	EN	PANTROIA	TESTE DE ACÚSTICA SUBMARINA II – DIA 01	1. FIADAS DE 1500 JJ A 3 KNTS E RUMO: 323/143	ORIGINAL
1008	10:00-12:00	TRÂNSITO EN-PANTROIA	EN & CEOV	EN	-	LEVAR O MATERIAL NECESSÁRIO PARA EFETUAR OS TESTES DE ACÚSTICA SUBMARINA – DIA 02	1. FERRY NÃO DISPONÍVEL	ORIGINAL
1012	13:00-1400	SYSCHECK	EN & CEOV	EN	CAIS	TESTE A TODOS OS SISTEMAS NO CAIS (SOFTWARE & HARDWARE) – AFERIR A OPERACIONALIDADE DOS SISTEMAS	1. APOIO DO SARGENTO ETS SILVESTRE	ORIGINAL
1014	14:00-14:15	COMMSCHECK	EN & CEOV	EN	PANTROIA	TESTE DE COMUNICAÇÕES – CAIS & EMBARCAÇÃO	NIL	ORIGINAL
1016	14:1517:30	ZIGUEZAGUE EM TODAS AS FIADAS SOM 220 HZ E NAVIO FIADAS INVERSAS	EN & CEOV	EN	PANTROIA	TESTE DE ACÚSTICA SUBMARINA III – DIA 02	1. FIADAS DE 1500 JJ & 3 KNTS 2. RUMOS: 323 &143	ORIGINAL